

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»
Академия электротехнических наук Российской Федерации

МАТЕРИАЛЫ

Международной научно-технической конференции

«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ»

(XXII Бенардосовские чтения),

***75-летию
теплоэнергетического факультета
посвящается***

31 мая – 2 июня

II том
Теплоэнергетика

Иваново 2023

В II томе материалов конференции представлены статьи, отражающие результаты научных исследований в области тепловых и атомных электрических станций; промышленная теплоэнергетика; теплообмен в теплотехнологических установках и процессах; систем управления и автоматизации; рассмотрены вопросы математических методов в технике и технологиях.

Редакционная коллегия:

Ледуховский Г.В., д.т.н., профессор – председатель;
Тютиков В.В., д.т.н., профессор;
Шуин В.А., д.т.н., профессор;
Казаков Ю.Б., д.т.н., профессор;
Косяков С.В., д.т.н., профессор;
Бухмиров В.В., д.т.н., профессор;
Колганов А.Р., д.т.н., профессор;
Бушуев Е.Н., д.т.н., доцент;
Колибаба В.И., д.э.н., профессор;
Карякин А.М., д.э.н., профессор;
Клюнина С.В., начальник УИУНЛ.

По материалам Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XXII Бенардосовские чтения) будет выпущен электронный сборник научных трудов, который будет размещен в научной электронной библиотеке на eLIBRARY.RU договор № 1042-03/2015К

75-летию теплоэнергетического факультета посвящается

ISBN 978-5-00062-573-6
ISBN 978-5-00062-575-0 (Т. 2)

© ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2023

СЕКЦИЯ 4.

«СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ»

УДК 681.5

Ю.С. ТВЕРСКОЙ, д.т.н., профессор
М.Ю. ТВЕРСКОЙ, к.т.н., доцент
А.В. ГОЛУБЕВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: tverskoy@su.ispu.ru

К вопросу о критериальных противоречиях современных моделей энергетических рынков

Аннотация. В докладе рассматриваются вопросы системно-рыночных противоречий, связанные с задачами эффективного управления балансом мощности в электроэнергетической системе.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, объект генерации, системные и рыночные критерии эффективности, САУМ, АСУТП.

Yu. S. TVERSKOY, Doctor of Engineering, professor
M.Yu. TVERSKOY, Candidate of Technical Sciences, associate Professor
A.B. GOLUBEV, Candidate of Technical Sciences, associate Professor

Ivanovo State Power University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: tverskoy@su.ispu.ru

On the issue of criterion contradictions modern models of energy markets

Abstract. The report discusses the issues of systemic market contradictions in the Russian electric power industry related to the tasks of effective management of the power balance in the electric power system.

Key words: electric power system, generation facility, system and market performance criteria, SAUM, APCS

Введение. В современной энергозависимой цивилизации миссия электроэнергетики – это прежде всего жизнеобеспечение среды обитания человека и развитие новых энергоэффективных технологий. В настоящем докладе приводится анализ ключевых факторов системно-рыночных противоречий, рассмотренных в работе [1], требующих принятия соответствующих решений, в том числе на законодательном уровне.

Оценка уровня технологического развития цивилизации основывается на количестве энергии, которое цивилизация может использовать для своих нужд (шкала Кардашева) [2]. Несмотря на то, что это определение дано для систем планетарного масштаба, оно весьма конструктивно характеризует земные проблемы современного уровня энергетического жизнеобеспечения и социально-экономической конкурентоспособности всех видов предпринимательства.

Заманчивая панacea осуществить «*retailing business*»¹ в электроэнергетике привела к разделению вертикально интегрированной единой электроэнергетической системы (электроэнергетической отрасли) на конкурентный (генерация электроэнергии), монопольный (сетевой системообразующий комплекс) и потребительский (генерация финансовых потоков) секторы/подсистемы, к различным схемам организации рыночных механизмов и целому комплексу физических и юридических проблем, которые до сих пор не имеют адекватного решения не только в Российской Федерации, но и мире [3-6].

Суть критерияльных противоречий в электроэнергетике. ЭЭС представляет собой сложный производственно-технологический комплекс, функционирование которого подчиняется фундаментальным кибернетическим принципам общей теории систем. Управление режимом генерации активной мощности и ее обменом (перетоками по линиям электропередач) осуществляется путем обеспечения баланса между потреблением и генерацией по глобальному общесистемному критерию $f_c = const$, высокоточная стабилизация которого обеспечивает как структурно-динамическую устойчивость системы (системную надежность/живучесть), так и требуемое качество электроэнергии. Объем (цена/стоимость) используемых резервов первичного, соответственно, вторичного и третичного регулирования во многом характеризует экономическую эффективность системы и конкурентоспособность [7,8].

В условиях принятых рыночных механизмов и экономических отношений просматриваются два уровня проблем, не имеющих/требующих адекватного решения.

1. **Проблемы физико-технического системного уровня**, решение которых предопределяет саму возможность формирования непрерывного процесса генерации и потребления электроэнергии.

Обеспечение системной устойчивости протекания процесса генерации и потребления и управление процессом решается средствами АСДУ и САУМ энергоблоков в соответствии с глобальным общесистемным критерием $f_c = const$ **при минимуме первичных резервов для поддержания баланса мощности** (экономический критерий системной эффективности в ЭЭС).

2. **Проблемы рыночного характера**, которые связаны с принятыми моделями энергорынков, и решение которых должно обеспечивать

¹ *Retailing* - сквозной процесс розничной торговли от поставщика до потребителя.

формирование непрерывных финансовых потоков от потребителя к производителю продукта и его адекватное распределение между участниками процесса генерации и потребления.

Методики формирования стоимости продукта определяются локальными разнонаправленными критериями «ПРИБЫЛЬ» множества коммерческих структур производителя и «поставщиков» в логистическом канале (сеть). При этом особо следует выделить проблемы терминологического характера, связанные с некоторыми определениями и понятиями производимого продукта и оказываемых услуг.

Анализ ключевых факторов и механизмов управления. Известно, что структурными составляющими саморегулируемых рынков являются три ключевых фактора: ассортимент, интерфейс, логистика, при этом главным действующим лицом процесса является Потребитель, формирующий финансовые потоки [9].

А что мы имеем в электроэнергетике?

1. **Ассортимент** объектов генерации как единственный продукт электроэнергетической системы для потребителя обезличен. Поэтому ключевым фактором эффективности процесса может служить только качество поставляемого продукта в точке его потребления.

2. **Интерфейс** - устройство коммерческого учета потребляемой электроэнергии, посредством которого осуществляется физический анонимный контакт с электроприборами потребителя.

Интерфейс определяет границу поставки продукта, качество которого на этой границе не определено и которое может существенно различаться в разных точках сети (например, в коммунальном секторе с учетом протяженности и существенных потерь в сетях низкого напряжения).

3. **Логистика** определяется жесткой структурой сетевого комплекса от объекта генерации до потребителя, при этом логистические затраты на поставку не зависят от объема продаж электроэнергии.

Надо отметить, что в рыночной экономике совершенным логистическим каналом принято считать канал, из которого исключены все не создающие ценность продукта посредники. Однако в электроэнергетической системе производства и одновременного потребления генерируемого единственного обезличенного продукта созданы и функционируют некие «псевдологистические» коммерческие организации типа «гарантирующий поставщик», не создающие дополнительной ценности продукта, при этом *целевая функция* «гарантирующих поставщиков» согласно устава - получение прибыли.

Анализ особенностей механизмов управления показал:

1) принцип конкурентной борьбы за конечного потребителя, как необходимый фактор рынка и формирования устойчивого финансового потока, отсутствует. При этом потребитель в взыскательном порядке оплачивает как затраты, так и маржу для всех структур/организаций, участвующих в сквозном процессе генерации, передачи и потребления электроэнергии без оценки ее качества в точке потребления;

2) коммерческий локальный критерий «прибыль» входит в явное противоречие с глобальным динамическим критерием общесистемной надежности, стабилизация которого обеспечивает целостность системы и эффективность ее работы (известны крупнейшие аварии, произошедшие в России и мире по причине нарушения системных критериальных приоритетов). Иными словами, локальные коммерческие критерии должны быть согласованы с глобальными критериями эффективно функционирования ЭЭС;

3) «гарантирующие поставщики», в соответствии с критерием «прибыль», не заинтересованы в мониторинге качества поставляемого продукта и уменьшении сетевых потерь (реализуют принцип «потребитель оплатит все»);

4) имеет место неадекватная трактовка понятия «УСЛУГА²» при формировании модели рынка системных «услуг» по обеспечению системной надежности и участием в этом процессе объектов генерации;

5) коммерческие структуры, осуществляющие виртуальные процедуры купли/продажи обезличенного продукта, являются генераторами дополнительных внешних контролируемых возмущений на графике нагрузок, что требует БОльших первичных резервов для поддержания баланса мощности в ЭЭС.

Резюме.

1. Россия в системе жестких конкурентных экономических отношений для обеспечения конкурентоспособности предпринимательства должна эффективно использовать имеющееся существенное преимущество экспортера углеводородов для собственных нужд на всей территории страны.

2. Принятые модели энергорынков критериально противоречивы, не обеспечивают качество продукта у конечного потребителя, не являются саморегулируемыми, что требует доработки структуры рынков электроэнергии и мощности на законодательном уровне.

3. При принятии решений по совершенствованию моделей энергорынков необходимо опираться прежде всего на физико-технические особенности иерархической ЭЭС (непрерывность процесса генерации и потребления), на понимание кибернетических принципов устройства большой системы интегрирующего типа, обеспечение структурной устойчивости которой выполняется средствами АСДУ и САУМ энергоблоков в соответствии с глобальным общесистемным критерием $f_c = const$ и минимизации первичных резервов для поддержания баланса мощности.

4. Системный оператор оказывает услугу путем создания актуальной расчетной модели энергосистемы, которая учитывает прогноз по-

² ГОСТ Р 57488-2017 (Услуги для бизнеса. Классификация и общие требования. Введен 2017-10-01. Национальный стандарт РФ).

Услуга (сервис, service) – любая деятельность или работа, которую одна сторона может предложить другой, характеризующаяся отсутствием предлагаемой материальной осязаемости такой деятельности и не выражающаяся во владении чем-либо.

требления электроэнергии (согласно заключенных договоров), состав генерирующего оборудования и актуальную топологию сети. На основе полученной модели выполняется оптимизационный расчет предварительного диспетчерского графика (ПДГ) объектам генерации (электростанциям) на планируемые сутки по заданным критериям и технологическим ограничениям участка сети и др.

Литература

1. О критериальных системно-рыночных противоречиях в электроэнергетике и их связи с задачами эффективного управления балансом мощности в электроэнергетической системе / Ю.С. Тверской, В.А. Демьяненко, М.Ю. Тверской, А.В. Голубев и др. // «Новое в российской энергетике» НРЭ, 2022, №3. С. 6-24.
2. Кардашев Н.С. Передача информации внеземным цивилизациям. // Астрономический журнал, 1964. № 6. С.37-46.
3. Кудрявый В.В. Российская электроэнергетика: настоящее и будущее // ж. «Энергетическая политика». - Выпуск 2-3, 2002. С. 37-46.
4. Кудрявый В.В. Риск преобразований в электроэнергетике // В кн. «Технология АСУТП электростанций». Под ред. проф. Ю.С. Тверского // Иваново: ИГЭУ, 2005. С. 20-27.
5. Анализ итогов реформирования РАО "ЕЭС России" и эффективности деятельности созданных на его базе структур // Стенограмма парламентских слушаний Комитета Государственной Думы по энергетике, 6.11.2013 г.
6. Уринсон Я.М., Кожуховский И.С., Сорокин И.С. Реформирование российской электроэнергетики: результаты и нерешенные вопросы. // Экономический журнал ВШЭ, № 24(3), 2020. - С. 323-339.
7. Правила оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике / Постановление Правительства РФ № 854 от 27.12.2004 // с изм. ред. № 937 от 13.08.2018 и № 86 от 30.01.2021.
8. ГОСТ Р 55890-2013. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно диспетчерское управление. Регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования / М.: Стандартиформ, 2014. – 51 с.
9. Тверской М.Ю. Retailing для русскоговорящих: управление предприятием розничной торговли. - СПб.: Изд. «Питер», 2022. – 480 с.

УДК 681.5.01

Ю.С. ТВЕРСКОЙ, д.т.н., профессор
Ю.А. ГАЙДИНА, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: tverskkoj@mail.ru

О технологии интеллектуализации АСУТП на базе ПТК (в аспекте автоматизации объектов генерации)

Аннотация. В докладе рассмотрены концептуальные проблемы технологии модернизации и структурного синтеза интеллектуальных АСУТП объектов гене-

рации путем апгрейда информационного пространства системы и соответствующих элементов и алгоритмов.

Ключевые слова: АСУТП, интеллектуализация, технология, эффективная информация, структурный синтез, САУ

Yu.S. TVERSKOY, Doctor of Engineering, professor
Ju.A. GAYDINA, postgraduate student

Ivanovo State Power University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: tverskkoj@mail.ru

On the technology of intellectualization of process control systems based on PTK (in terms of automation of generation objects)

Abstract. The report considers the conceptual problems of the technology of modernization and structural synthesis of intelligent process control systems for generation facilities by upgrading the information space of the system and the corresponding elements and algorithms.

Key words: APCS, intellectualization, technology, effective information, structural synthesis, ACS

Введение. Сущность функционирования современных многофункциональных АСУТП на базе программно-технических комплексов (ПТК) сетевой иерархической структуры заключается во взаимодействии двух процессов: технологического процесса, протекающего в объекте управления (ОУ), и процесса обработки информации в управляющей системе [1].

Присутствие в контуре управления энергоблоком и электростанции человека-оператора требует в общем случае рассматривать современные многофункциональные АСУТП в классе интеллектуальных эргатических систем управления. При этом задача человека-оператора сводится к решению трех проблем [2]:

- наблюдение за ходом технологического процесса и адекватный анализ/оценка его эффективности;
- принятие оперативных решений с целью исключения возможности возникновения аварийных ситуаций;
- многокритериальная/интеллектуальная оптимизации технологического процесса в штатном режиме работы оборудования средствами автоматического управления.

Суть проблемы эффективного управления. Анализ хода технологического процесса, оперативные и оптимизационные решения требуют переработки большого объема потоков информации. В неординарных ситуациях поток и скорость обновления информации существенны, что, как правило, ведет к проявлению так называемого «человеческого фактора». С одной стороны, это связано со специфическими особенностями

информационно-динамической модели человека-оператора. С другой стороны, объем оперативной информации, анализируемой оператором, зависит как от информационного масштаба системы, так и от уровня автоматизации технологического процесса/объекта в целом, который определяется работоспособностью/эффективностью принятых проектных решений [3-5].

Поэтому вопрос: «Каким путем осуществить повышения интеллектуальных способностей эргатической системы от ее текущего/проектного состояния многофункциональной АСУТП до интеллектуально-эффективного уровня?» - остается открытым, а **разработка методов** решения этой проблемы представляется актуальной задачей сквозной технологии создания/модернизации многофункциональных АСУТП объектов генерации.

Основной результат развития технологии. Поставленную задачу повышения уровня интеллектуализации АСУТП, находящихся в эксплуатации, в настоящей работе предлагается решать путем анализа ключевых факторов сдерживания («узких мест»).

Развиваемая технология предусматривает решение проблемы как минимум на трех уровнях АСУТП:

- уровень первичной информации;
- контроллерный уровень структурного синтеза эффективных САУ;
- верхний командно-аналитический уровень АСУТП в соответствии с сутью обозначенных выше общих задач человека-оператора в эргатической системе.

Первый этап технологии модернизации требует решения прежде всего информационных проблем и связан с сформированной единой информационной базой системы, которая объединяет позадачную информацию вертикально интегрированных СУ в единый информационный банк **эффективной** информации АСУТП (полевой уровень) [6]. При этом следует обратить внимание, что информационный масштаб современных АСУТП имеет, как правило, опытно-коммерческое происхождение, а это требует его строгого теоретического обоснования, поскольку информационный масштаб системы напрямую связан с ее стоимостью. Методология формирования эффективной информации опирается на метод термодинамических потенциалов и координат неравновесной термодинамики [7,8].

Второй этап технологии связан с проблемами структурного синтеза эффективных САУ, обеспечивающих **живучесть системы** на контроллерном и исполнительном уровнях [9].

Третий этап технологии связан с задачами верхнего командно-аналитического/интеллектуального уровня АСУТП [4,5]. Для практической реализации ресурсно-затратных интеллектуальных задач, которые выйдут за пределы типовых функций АСУТП, возможности современных ПТК весьма **ограничены**. Иными словами, развитие АСУТП в направлении внедрения интеллектуальных функций требует оптимизации технической

структуры АСУТП и обновления вычислительной мощности средств ПТК (полевой зоны, контроллеров, серверов, операторских и рабочих станций) до необходимого уровня требований решаемых задач [10].

Резюме.

Принимая программу модернизации АСУТП с целью повышения ее уровня автоматизации и интеллектуализации, необходимо выполнить:

1. Апгрейд информационной подсистемы АСУТП методом обобщенного термодинамического анализа на предмет решения основной проблемы модернизации, связанной с формированием банка эффективной/адекватной информации и обоснования информационного масштаба большой системы (минимизация стоимости эксплуатационного ресурса).

2. Апгрейд подсистем локального/фундаментального уровня на предмет структурного синтеза структурно устойчивых эффективных САУ, обеспечивающих гарантированную работоспособность на контроллерном/исполнительном уровне, в том числе - с эффективными математическими моделями в контуре управления и др.

3. Апгрейд и развитие алгоритмов верхнего командно-аналитического/интеллектуального уровня АСУТП оперативного решения блочных и общестанционных задач экономически эффективного участия в поддержании общесистемных параметров ЭЭС.

Литература

1. Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП электростанций: Монография / В 3-х кн. Под ред. Ю.С. Тверского // Иваново: ИГЭУ, 2013. Кн. 1 – Проблемы и задачи. – 260 с. Кн. 2 – Проектирование. – 436 с. Кн. 3. Моделирование. 176 с.

2. РД 34.20.501-95. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации /М-во топлива и энергетики РФ, «РАО ЕЭС России» - 15 изд., перераб. и доп. - М.: СПО ОРГРЭС, 1996. – 160 с.

3. Тверской Д.Ю., Тверской Ю.С. Задачи и проблемы совершенствования АСУТП энергоблоков в направлении их интеллектуализации: Сб. докл. IV Всерос. науч. конф. «Управление и информационные технологии». СПб.: ЛЭТИ, 2006. С. 230–236.

4. Тверской Ю. С., Таламанов С.А. Особенности и проблемы современного этапа развития технологии создания АСУТП тепловых электростанций. // Теплоэнергетика. – 2010. - №10. - С.37-44.

5. Косой А.А. Выбор оптимальной структуры интеллектуальной АСУТП ТЭС на базе ПТК // Автореф. дис. ... к.т.н. / Москва: НИУ «МЭИ», 2021. 24 с.

6. Тверской Ю.С. Методы и алгоритмы машинного расчета систем регулирования тепловых процессов: учеб. пособие // Изд. Ив.ГУ, Иваново, 1979. - 90 с.

7. Tverskoi D.Yu. A generalized thermodynamic analysis of the efficiency of coal-pulverization systems // Thermal Engineering. – 2010. – Т.57. – № 8. – Р. 682-688.

8. Тверской Д.Ю. Применение обобщенного термодинамического анализа в задаче определения координат технологического объекта управления // Вестник ИГЭУ, вып. 1, 2011. – С.88-92.

9. Тверской, Ю.С. К вопросу структурного синтеза эффективных систем управления технологическим процессом /Ю.С. Тверской, И.К. Муравьев, Д.Ю. Тверской, Ю.А. Гайдина // Датчики и системы, - 2022. - №6. – С.20-32.

10. Гайдина Ю.А. К вопросу технологии апгрейда ПТК современных АСУТП / Ю.А. Гайдина // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения). Том 2. Теплоэнергетика: Международная (XXII Всероссийская) научно-техническая конференция г. Иваново, 2023 г.: материалы конференции. – Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – 2023. – Т.2.- С.

УДК 681.5.58

Ю.А. ГАЙДИНА, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: menksi@mail.ru

К вопросу технологии апгрейда ПТК современных АСУТП

Аннотация. Рассматриваются вопросы технологии модернизации АСУТП и особенности апгрейда ПТК по результатам технического аудита и требований новых задач управления.

Ключевые слова: АСУТП, ПТК, диагностика, апгрейд

J.A. GAYDINA, postgraduate student

Ivanovo State Power University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: menksi@mail.ru

On the issue of technology for upgrading the hardware and software complex of modern process control systems

Abstract. The issues of the technology of modernization of the process control system and the features of the upgrade of the hardware and software complex based on the results of a technical audit and the requirements of new control tasks are considered.

Key words: APCS, software and hardware complex, diagnostics, upgrade

Технологическое оборудование электростанций оснащается многофункциональными АСУТП на базе программно-технических комплексов (ПТК) сетевой иерархической структуры. Находящиеся в эксплуатации АСУТП соответствуют комплексу требований (надежности, безопасности, открытости и др.) на момент разработки технического задания (ТЗ) и сдачи пускового комплекса в эксплуатацию. Несмотря на то, что проектами предусматриваются определенные резервы [1] для текущей модернизации, с течением времени происходит моральное и физическое старение программно-аппаратных средств.

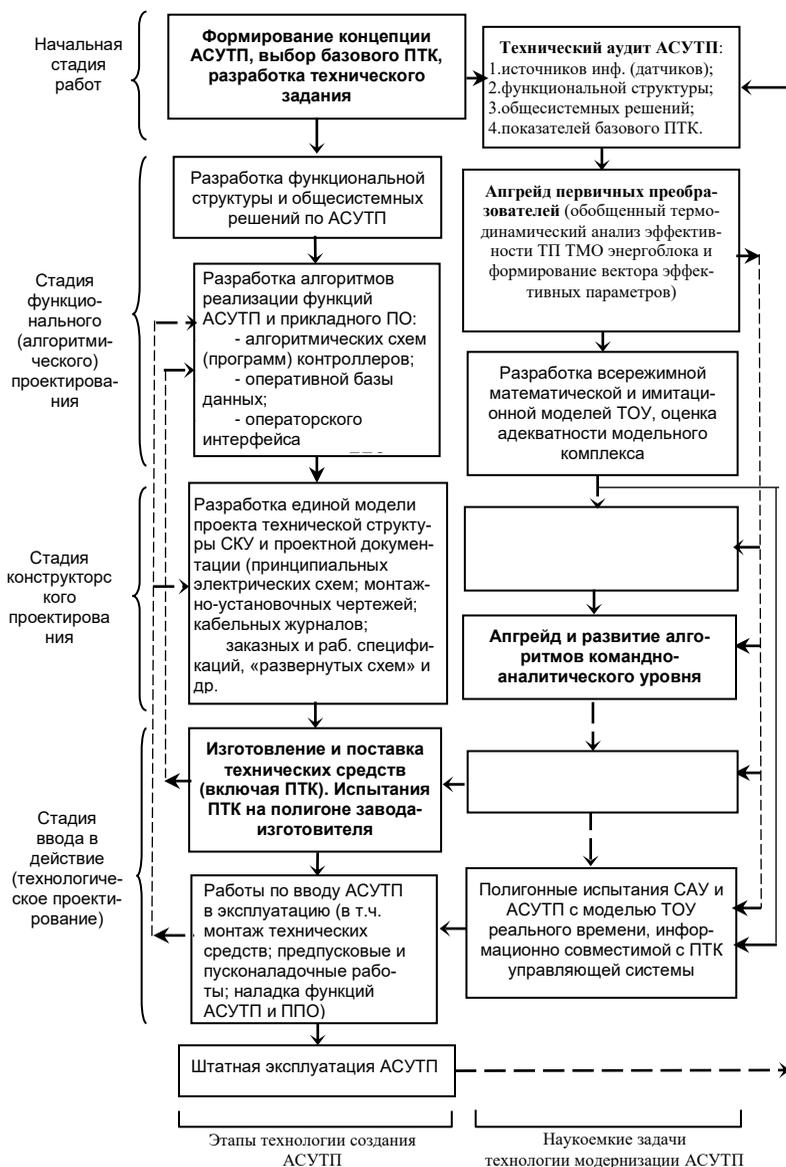


Рис. 1. Технология создания АСУТП на базе ПТК и наукоемкие этапы модернизации в условиях длительной эксплуатации

При этом новые требования, рассматриваемые, например, в аспекте повышения интеллектуальности действующих АСУТП, требуют поддержания соответствующей вычислительной мощности технических средств ПТК (контроллеров, серверов, операторских и рабочих станций).

Поэтому разработка соответствующей **технологии** апгрейда программно-аппаратных средств с целью поддержки новых алгоритмических решений по перспективным направлениям развития современных АСУТП представляется неотъемлемой задачей проводимых разного рода модернизаций средств автоматизации в условиях длительной эксплуатации [2,3].

Суть проблемы. Модернизации АСУТП на базе ПТК предусматривает возможность разработки и интеграции дополнительных наукоемких подсистем управления (рис.1).

При этом технология апгрейда программно-аппаратных средств определяется результатами **технического аудита АСУТП** и требованиями для реализации новых задач.

Апгрейд ПТК при этом будем рассматривать в двух аспектах:

- в аспекте штатной эксплуатации по результатам диагностики текущего состояния АСУТП и непосредственно ПТК (нацелена на раннее обнаружение неисправностей технических средств и выдачу соответствующих рекомендаций по их устранению);

- в аспекте выполнения повышенных требований ТЗ модернизации по разработке новых функций АСУТП и информационно-интеллектуальной поддержке оператора.

Встроенная диагностика текущего состояния ПТК позволяет прогнозировать срок службы компонентов в зависимости от реальных условий их эксплуатации и фактического состояния. Это позволяет своевременно выполнять апгрейд компонентов и ликвидировать незапланированные простои или уменьшить их длительность.

После того, как проведено техническое диагностирование АСУТП и выявлены «узкие» места работы оборудования и его систем управления, необходимо выбрать один из двух путей развития (в зависимости от решаемой задачи и финансовой составляющей): апгрейд или закупка нового технического устройства, которое будет перспективно для дальнейшей модернизации.

Литература

1. ГОСТ 24.104-85 (с поправкой ИУС 8-2003). «Автоматизированные системы управления. Общие требования». / М.: 2003.
2. Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. // Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского. Кн. 1. Проблемы и задачи. Кн. 2. Проектирование. Кн. 3. Моделирование. – Иваново, ИГЭУ, 2013. Кн. 1. 260с. Кн. 2. 436 с. Кн.3. 176с.
3. Ицкович Э.Л. Особенности современных АСУТП. М.: ИПУ РАН, 2017. 523 с.

УДК 681.5.017

А.В. ГОЛУБЕВ, к.т.н., доцент
Н.А. КРУТИКОВ, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: kafsu@su.ispu.ru

Разработка подсистемы оценки пусков и остановов энергоблока 210 МВт

Аннотация. На основе компьютерного тренажера ПТК «ТЕКОН» конденсационного энергоблока 210 МВт Сургутской ГРЭС была разработана система оценки действий персонала по пуску и останову энергоблока.

Ключевые слова: автоматизация, моделирование, энергоблок, система оценки.

A.V. GOLUBEV, PhD
N.A. KRUTIKOV, graduate student

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: kafsu@su.ispu.ru

Development of a subsystem for evaluating starts and shutdowns of a 210 MW power unit

Abstract. Based on the computer simulator of the PTK "TEKON" of the 210 MW condensing power unit of the Surgut GRES, a system for evaluating the actions of personnel for starting and stopping the power unit was developed.

Key words: automation, modeling, power unit, evaluation system.

На энергообъектах должна проводиться постоянная работа с персоналом, направленная на обеспечение его готовности к выполнению профессиональных функций и поддержание соответствующего уровня его квалификации [1].

Для решения этой проблемы создаются тренажёры энергетического оборудования, которые обеспечивают возможности:

- выработки у обучающихся интеллектуальных навыков управления энергетическим оборудованием в наиболее сложных режимах его работы;
- глубокого анализа самых сложных режимов работы оборудования и совершенствования на этой основе режимных карт и эксплуатационных инструкций;
- опережающего обучения персонала и анализа режимов для новых типов энергоблоков, которые ещё не введены в действие и не освоены в эксплуатации, а также для реконструируемого оборудования;
- совершенствования оперативной квалификации руководящего технического персонала ТЭС, которому в сложных технологических

ситуациях нередко приходится принимать на себя руководство ведением режимов;

- анализа причин аварийных ситуаций, произошедших на реальном блоке.

Основными преимуществами компьютерных тренажёров являются компактность и оперативность развёртывания тренажёрного комплекса, а также возможность реализации сложных и информационноёмких моделей технологических объектов [2].

На основе компьютерного тренажера конденсационного энергоблока 210 МВт Сургутской ГРЭС, реализованного на базе ПТК «ТЕКОН» была разработана система оценки действий персонала по пуску и останову энергоблока.

Данная система оценки может быть применена для решения следующих задач:

- обучения и повышения квалификации оперативного персонала, управляющего теплоэнергетическим оборудованием; привитие ему навыков эксплуатации и наиболее эффективного использования оборудования, способности быстро и адекватно действовать в условиях чрезвычайной ситуации; проведения тренировок по выполнению операций пуска/останова оборудования, противоаварийных тренировок, соревнований между оперативным персоналом тепловых электростанций;
- проектирования, отладки и тестирования устройств (систем) автоматического управления оборудованием, сопоставление различных схем регулирования.

В основе тренажера лежит математическая модель теплоэнергетического объекта [2], интегрированная с реальной АСУТП (включающей в себя все подсистемы АСУТП - технологические защиты, блокировки, ФГУ, контуры автоматического регулирования и сигнализацию) прототипа.

Система оценки, реализованная для энергоблока тепловой электростанции, позволяет воспроизвести все режимы нормальной эксплуатации этого энергоблока, включая режимы регулирования частоты и мощности для обеспечения общего и нормированного первичного (НПРЧ), а также автоматического вторичного регулирования частоты (ВРЧ).

Функциональные возможности системы оценки

Функции системы призваны обеспечить решение задачи повышения уровня профессиональной подготовки оперативного персонала тепловых электрических станций. Их можно условно разделить на три основные группы:

1. Подготовка тренировки. Для подготовки тренировки в тренажере предусмотрены следующие функционалы: подготовка начальных состояний оборудования (срезом) для тренировки; распределение контролируемых по ходу тренировки параметров по графикам; подготовка сценария тренировки с вводом-выводом неисправностей и комплексных возмущений по ходу тренировки; выбор критериев автоматизированной оценки результатов тренировки (рис. 1).

Адрес	Наименование	Формула	Значение
101_0_1_1	Обоз значений	$\text{if } '1_0' == '1_1' \text{ then } '101_0_1' = 0; '101_1' = 0; '101_2' = 0; '101_3' = 0; '101_4' = 0; '101_5' = 0 \text{ end}$	0,000
101_0_1	Условие выполнения критерия	$\text{if RES100.Value=1 then GO_TO('101_6') else GO_TO('101_0') end}$	0,000
101_0	Ротор ЦВД выход из диапазона +4 ... -1,2 мм	$\text{if } '2_0' < -1,2 \text{ or } '2_0' > 4,0 \text{ then } r=1,0 \text{ else } r=0,0 \text{ end}$	0,000
101_1	Ротор ЦВД выход из диапазона +4,5 ... -2,5 мм	$\text{if } '2_1' < -2,5 \text{ or } '2_1' > 4,5 \text{ then } r=1,0 \text{ else } r=0,0 \text{ end}$	0,000
101_2	Ротор ЦВД выход из диапазона +3 ... -2,5 мм	$\text{if } '2_2' < -2,5 \text{ or } '2_2' > 3,0 \text{ then } r=1,0 \text{ else } r=0,0 \text{ end}$	0,000
101_3	Искоренение вала (период подачи пара в турбину) при ра.	$\text{if } '2_4' > 0,07 \text{ and } '2_5' < 15,0 \text{ then } r=1,0 \text{ else } r=0,0 \text{ end}$	0,000
101_4	Искоренение вала (при наборе оборотов): Более 0,2 мм	$\text{if } '2_4' > 0,2 \text{ and } '2_5' < 3003,0 \text{ then } r=1,0 \text{ else } r=0,0 \text{ end}$	0,000

Рис.1. Фрагмент логической реализация критерия «Мехвеличины турбогенератора»

2. Проведение тренировок. Проведение оценивания действий персонала на тренажере обеспечивается следующими функциями: загрузка подготовленных заранее исходных состояний; запуск и приостановка выполнения программ тренажера; возобновление хода тренировки с любого сохраненного заранее места; контроль за ходом тренировки с одной или нескольких операторских станций; ускорение/замедление выполнения программ тренажера; ввод отказов (неисправности оборудования, повреждения трубопроводов и т.п.).

3. Оценка тренировок. После завершения тренировки предусмотрена возможность оценки качества ведения технологического процесса оперативным персоналом (рис. 2): просмотр графиков с любыми технологическими параметрами за все время тренировки; получение результата автоматизированной оценки действий оперативного персонала по заранее установленным критериям; просмотр хода тренировки в режиме реального времени или с ускорением/замедлением.

Этапы выполнения		Оценка действий по дополнительным критериям	
Начело	---	1. Скорость изменения Т ОП перед турбиной	---
Этап 1	---	2. Скорость изменения Т пара ГПП перед турбиной	---
Этап 2	---	3. Разность Т стенок СК ЦВД	---
Этап 3	---	4. Скорость прогрева СК ЦВД	---
Этап 4	---	5. Разность Т по вилкам фланцев ЦВД	---
Этап 5	---	6. Разность Т внутренней-внешней стенки ЦВД	---
Конец	---	7. Разность Т фланцев и вилки ЦВД	---
Оценка действий по основным критериям		8. Разность Т по вилкам фланцев ЦСП	---
1. Мехвеличины турбоагрегата	---	9. Разность Т фланцев и вилки ЦСВ	---
2. Вибрации в кондре на ХС и малых нагрузках	---	10. Превращение Тп на сначку турбоагрегата	---
		11. Вибрация подшипников опого турбоагрегата	---

Рис.2. Фрагмент мнемосхемы оценки пусковых операций

Таким образом, на основе компьютерного тренажера конденсационного энергоблока 210 МВт Сургутской ГРЭС была разработана система оценки действий персонала по пуску и останову энергоблока, которая позволит повысить профессиональную подготовленность оперативного персонала при ведении сложных режимов работы оборудования.

Литература

1. Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн.: Кн. 1. Проблемы и задачи. Кн. 2. Проектирование. Кн. 3. Моделирование / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С.

Тверского; ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2013. Кн. 1, 260 с.; Кн. 2 436 с.; Кн. 3, 176 с.

2. Тверской Ю.С., Никоноров А.Н. Направления развития тренажёростроек в энергетике // Тез. докл. IV Рос. науч.-практ. конф. «Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования» / Под ред. А.В. Мошкаркина. – Иваново: Изд. ИГЭУ, 2005. – С. 195-197.

УДК 681.5.017

А.В. ГОЛУБЕВ, к.т.н., доцент
В.А. ЛЕДНЕВ, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: kafsu@su.ispu.ru

Разработка 3D тренажера для персонала КИПиА

Аннотация. Статья посвящена разработке тренажера местного персонала КИПиА в виртуальной реальности по средствам среды разработки Unity, целевой платформой является гарнитура виртуальной реальности Oculus Quest 2.

Ключевые слова: тренажер, КИПиА, виртуальная реальность, сетевой подогреватель, Unity, 3D, VR, Oculus Quest.

A.V. GOLUBEV, PhD
V.A. LEDNEV, graduate student

Ivanovo State Power University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskya St., 34
E-mail: kafsu@su.ispu.ru

Development of a 3D simulator for I&C staff

Abstract. The article deals with the development of a simulator for I&C personnel in virtual reality by means of Unity 3D development environment, the target platform is a virtual reality headset Oculus Quest 2.

Key words: simulator, instrumentation, virtual reality, network heater, Unity, 3D, VR, Oculus Quest.

Стабильная и безопасная работа технологического оборудования во многом зависит от квалификации обслуживающего персонала. Наиболее эффективными методами подготовки являются упражнения на компьютерных тренажёрах. В которых заложены сценарии возможных ситуаций и достаточный математический аппарат для моделирования физических процессов, протекающих в оборудовании. Анализ библиотеки имеющихся компьютерных тренажёров показал, что на данный момент они не погружают обучающегося в ситуацию, а лишь дают математическое описание происходящего.

В рамках данной статьи предлагается создание тренажера виртуальной реальности, который максимально приблизит обучающегося к моделируемой ситуации, стирая грань между компьютерной симуляцией и реальным поведением местного персонала в той или иной обстановке.

В качестве прототипа для моделирования был выбран горизонтальный сетевой подогреватель ПСГ-5000-2.5-8-1. Подогреватель сетевой воды – устройство, используемое в оборудовании теплоснабжения. Он предназначается для подогрева сетевой воды паром из отборов турбин (на тепловой электростанции) и котлов низкого давления (в котельных ЖКХ и производственных помещений).

Математическая модель технологического процесса основана на законах сохранения энергии для греющего и обогреваемого теплоносителей, а также для металла теплообменного аппарата. Выявлены зависимости по всем каналам возможных возмущений с целью выражения передаточных функций по каналам управления объектом и каналам внутренних и внешних возмущений. Математическая модель была реализована в среде имитационного моделирования SimInTech.

Данные, содержащие информацию о параметрах, характеризующих работу технологического объекта собираются в вектор и отправляются в графическую составляющую тренажера по средствам протокола передачи данных UDP. В исполняемом файле тренажера реализована функция получения этих данных их расшифровка и дальнейшее представление на мнемосхеме.

Графическая составляющая модели отделения сетевых подогревателей выполнена в среде разработки Unity специально для использования совместного с гарнитурой виртуальной реальности Oculus Quest 2. Интерфейс пользователя тренажера позволяет взаимодействовать с технологическим объектом по средствам изменения положения регулирующих клапанов и запорной арматуры (рис.1). Это необходимо для реализации возможности создания аварийной ситуации в целях тренировки действий в ситуациях подобных смоделированной. Кроме того, в виртуальном помещении представлен полноценный стенд с мнемосхемой технологического участка и возможностью влиять на задание системы регулирования, а также запустить процедуры пуска или останова оборудования.

Данные о воздействии оператора на систему регулирования также отправляются по средствам протокола UDP в программный комплекс SimInTech, где математически рассчитывается дальнейшее поведение технологического объекта.

Кроме моделирования теплотехнического оборудования в тренажере так же представлена возможность влиять на электронную составляющую объекта регулирования, т.е. датчики, кабели, вторичные приборы, а также кроссовые шкафы, шкафы питания и контроллеров (рис. 2).

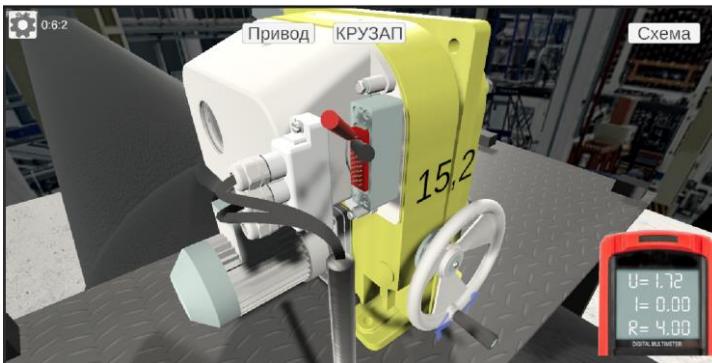


Рис. 1. Фрагмент трёхмерной визуализации полевой зоны тренажера

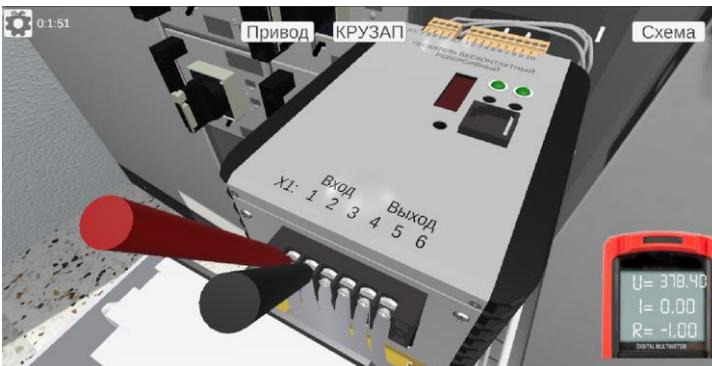


Рис. 2. Фрагмент трёхмерной визуализации неоперативной зоны БЩУ

В целях обучения и тренировок представлены такие сценарии как:

- отработка пуска и останова оборудования;
- отказ одного из регулирующих органов;
- отказ насосов, поддерживающих стабильную работу системы;
- ремонт и(или) замена датчиков или их чувствительных элементов;
- диагностика неисправностей проводки (таких как обрыв кабеля или ухудшение контакта в клеммнике);
- обслуживание шкафного оборудования;
- намеренный вывод оборудования из стабильного режима работы (в показательных целях).

Литература

1. Experience and features of innovative training of specialists in the field of automation at the proving ground of power plant APCS // Tverskoy Y.S., Tselishchev E.S.,

Golubev A.V., Muravev I.K., Nikonorov A.N. В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. 3. Сер. "3rd Conference "Problems of Thermal Physics and Power Engineering" - Actual Issues of Thermal Power Engineering and Thermal Engineering" 2020. С. 042058.

2. Особенности взаимодействия программно-технических комплексов и систем моделирования в учебно-исследовательских АСУТП // Голубев А.В., Никоноров А.Н., Муравьев И.К. Автоматизация в промышленности. 2021. № 12. С. 17-23.

УДК 681.5.015

И.К. МУРАВЬЕВ, к.т.н., доцент
А.Ю. ТРИФОНОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: muraviev@gapps.ispu.ru, crysis35346723@gmail.com.

Анализ современных методов идентификации динамических характеристик объектов управления

Аннотация. В работе рассмотрены методы идентификации динамических объектов управления. Выделены два подхода к оценке параметров модели.

Ключевые слова: идентификация, временные ряды, метод инструментальных переменных, метод наименьших квадратов, MATLAB

I.K. MURAVEV, candidate of technical sciences, docent,
A.Y. TRIFONOV, post-graduate student

Ivanovo State Power University
34, Rabfakovskaya st., 153003, Ivanovo
E-mail: muraviev@gapps.ispu.ru, crysis35346723@gmail.com.

Analysis of modern methods for identifying the dynamic characteristics of control objects

Abstract. The paper considers methods for identifying dynamic control objects. Two approaches to estimating model parameters are distinguished.

Key words: identification, time series, instrumental variables, least squares method, MATLAB

Результат синтеза систем автоматического управления (САУ) на стадии проектирования редко удовлетворяет практику, поскольку численные значения параметров контроллеров оказываются далекими от действительно оптимальных их значений. Это связано с тем, что ключительный этап синтеза приходится переносить на стадию ввода системы в действие [1].

В целом это приводит к одной из основных проблем АСУТП ТЭС, которая заключается в недостаточности уровня отработанности алгоритмов управления и соответствующего прикладного программного

обеспечения на момент вода системы в действие и возникающими большими издержками при отладке наиболее сложных управляющих функций АСУТП, в условиях, когда действующее оборудования энергоблока используется в качестве промышленной экспериментальной установки [2]. Решение проблемы видится в развитии интеллектуальных систем адаптивной идентификации объектов управления.

В настоящее время с развитием микропроцессорных технологий и ЭВМ всё чаще стали использоваться цифровые системы управления, оперирующие дискретными сигналами. В тоже время развитие распределённых АСУТП позволило применять богатый математический аппарат в решении задач идентификации и адаптивного управления [3].

Пусть модель линейного динамического объекта по типу «вход-выход» в представлении дискретного времени задаётся линейным разностным уравнением:

$$y(t) + a_1 \cdot y(t-1) + \dots + a_n \cdot y(t-n) = b_1 \cdot u(t-1) + \dots + b_m \cdot u(t-m), \quad (1)$$

где $y(t), u(t)$ - выход и вход модели соответственно в момент времени t ; $a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m$ - параметры модели.

Чтобы показать, как следующие измерения выхода модели зависят от предыдущих измерений входа и выхода и параметров модели, представим выражение (1) в виде уравнения линейной регрессии [3]:

$$\hat{y}(t | \theta) = \varphi^T(t) \cdot \theta, \quad (2)$$

где $\varphi(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-n), u(t-1), \dots, u(t-m)]^T$ - вектор предыдущих измерений или регрессионный вектор; $\theta = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m]$ - вектор параметров модели.

Таким образом ставится задача оценки параметров модели $\hat{\theta}_N$ по собранным данным реального объекта Z^N , как отображение:

$$Z^N \rightarrow \hat{\theta}_N \in D_M, \quad (3)$$

где $Z^N = [u(1), y(1), \dots, u(N), y(N)]$ - собранные данные объекта за N измерений; D_M - множество значений параметра θ в рамках модельной структуры M .

Выделяют следующие подходы оценки параметров моделей из заданного множества под наблюдаемые данные [3]:

- 1) подход, основанный на ошибке предсказания;
- 2) корреляционный подход.

Первый подход основан на минимизации ошибок предсказания:

$$\hat{\theta}_N = \arg \min_{\theta \in D_M} V_N(\theta, Z^N), \quad (4)$$

$$V_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^N \ell(\varepsilon_F(t, \theta)), \quad (5)$$

$$\varepsilon_F(t, \theta) = L(q) \cdot \varepsilon(t, \theta) = L(q) \cdot (y(t) - \hat{y}(t | \theta)), \quad (6)$$

где $V_N(\theta, Z^N)$ - минимизируемая критериальная функция; $\varepsilon(t, \theta)$, $\varepsilon_F(t, \theta)$ - выходная ошибка оценивания и отфильтрованная выходная ошибка с помощью предварительного фильтра $L(q)$; $\mathcal{L}(\varepsilon_F(t, \theta))$ - преобразование ошибки в виде нормы ошибок предсказания.

Аналитический вывод выражения (4) приводит к оценке параметров по методу наименьших квадратов (МНК):

$$\hat{\theta}_N^{\text{МНК}} = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^N \varphi(t) \cdot \varphi^T(t) \right]^{-1} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^N \varphi(t) \cdot y^T(t), \quad (7)$$

Второй подход основан на решении уравнения:

$$\hat{\theta}_N = \operatorname{sol}_{\theta \in D_M} [f_N(\theta, Z^N) = 0], \quad (8)$$

$$f_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^N \zeta(t, \theta) \cdot \varepsilon_F(t, \theta), \quad (9)$$

где $\zeta(t, \theta)$ - «корреляционный вектор» (вектор инструментальных переменных).

Такой подход возник из соображений о корреляции между регрессионным вектором $\varphi(t)$ и аддитивным шумом, наблюдающийся в измерениях выхода $y(t)$. В таком случае, оценка параметров по МНК $\hat{\theta}_N^{\text{МНК}}$ будет давать смещенную оценку [3]. Тогда следует рассматривать другой вектор, который скоррелирован с $\varphi(t)$, но не с аддитивным шумом. Такой вектор называют корреляционный или вектор инструментальных переменных и обозначается $\zeta(t)$.

Аналитический вывод выражения (8) приводит к оценке параметров по методу инструментальных переменных (ИП):

$$\hat{\theta}_N^{\text{ИП}} = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^N \zeta(t) \cdot \varphi^T(t) \right]^{-1} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^N \zeta(t) \cdot y^T(t). \quad (10)$$

Выбор инструментальных переменных предполагает сформировать вектор:

$$\zeta(t) = [-x(t-1), \dots, -x(t-n), u(t-1), \dots, u(t-m)]^T, \quad (11)$$

где $x(t)$ - выход модели с первоначальными параметрами, которые могут быть заданы или получены, например, с помощью МНК [3, 4].

В обоих подходах оценка параметров может производиться над отфильтрованными данными, полученными с помощью различных методов предварительной обработки [4]. Метод ИП может быть использован в несколько этапов, где на первом этапе проводится оценка по МНК и на последующих – по ИП. Такой подход был принят за основу итерационного или рекурсивно-итерационного метода ИП (ИИП) [5].

Литература

1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов // М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.

2. Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. Кн.3. Моделирование / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского; ИГЭУ. – Иваново, 2013. – Кн.1 – 260 с.
3. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: пер. с англ. / Под ред. Я.З. Ципкина. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. 432 с.
4. Garnier H., Mensler M., Richard A. Continuous-time model identification from sampled data: implementation issues and performance evaluation // International Journal of Control. 2003. Т. 76. №. 13. С. 1337-1357.
5. Young P.C. The refined instrumental variable method // Journal Européen des Systemes Automatisés. – 2008. – Т. 42. – №. 2-3. – С. 149-179.

УДК 621.438

И.К. МУРАВЬЕВ, к.т.н., доцент,
Д.А. ШИНКЕВИЧ, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: kafsu@su.ispu.ru, dan-shinkevich@yandex.ru

Исследование влияния режимных и климатических факторов на эффективность работы газовой турбины SGT5-4000F на модели в среде SimInTech

Аннотация. В данной статье приводятся результаты исследования режимных и климатических факторов на эффективность работы газотурбинной установки (ГТУ) SGT5-4000F. Исследования проводились на разработанной имитационной модели в среде динамического моделирования технических систем «SimInTech». Выполнена оценка влияния электрической нагрузки на показатели эффективности работы ГТУ при температурах наружного воздуха +15°C и -12°C.

Ключевые слова: имитационная модель, газотурбинная установка, КПД, мощность, помпаж.

I.K. MURAVEV, candidate of technical sciences, docent,
D.A. SHINKEVICH, graduate student

Ivanovo State Power University
34, Rabfakovskaya St., 153003, Ivanovo
E-mail: kafsu@su.ispu.ru, dan-shinkevich@yandex.ru

Investigation of the influence of regime and climatic factors on the efficiency of the SGT5-4000F gas turbine on SimInTech models

Abstract. This article presents the results of a study of regime and climatic factors on the efficiency of the gas turbine unit (GTU) SGT5-4000F. The studies were carried out on the developed simulation model in the environment of dynamic modeling of technical systems "SimInTech". The impact of the electrical load on the performance

indicators of the gas turbine unit at outdoor temperatures of +15°C and -12°C was assessed.

Key words: simulation model, gas turbine installation, efficiency, power, surge.

Эффективное использование ГТУ является важным условием качественной бесперебойной работы всей тепловой электростанции. При этом в различное время года важно поддерживать параметры эффективной эксплуатации ГТУ на оптимальном уровне.

Для проведения исследований была использована ранее разработанная в среде SimInTech имитационная модель ГТУ SGT5-4000F [1].

Среда динамического моделирования технических систем SimInTech предназначена для детального исследования и анализа нестационарных процессов в различных объектах, разработки математических моделей и алгоритмов управления. Среда SimInTech позволяет рассчитывать, моделировать, исследовать и синтезировать различные технические устройства (механические, гидравлические, теплотехнические, электротехнические и др., в том числе средства и системы автоматики) [2,3].

В состав модели SGT5-4000F включены расчеты основных конструктивных и технологических характеристик оборудования [4,5], в том числе: оценка полноты сгорания топлива; коэффициента форсировки; коэффициента запаса устойчивости компрессора и др.

Совокупность расчетных уравнений в рамках единой модели установки, обеспечивает достаточно точное описание физических процессов внутри ГТУ и ее технологических участков, в том числе определение характеристик параметров поступающего топлива и воздуха, обеспечение стабильности процесса горения и распределения потоков воздуха на охлаждение турбины.

В ходе исследования эффективности работы газотурбинной установки была произведена оценка влияния нагрузки на показатели ее эффективности. Значения технологических параметров были получены по режимной карте в диапазоне нагрузок от 50% до 100% (от 141 до 282 МВт) и при различных температурах наружного воздуха $T_{н.в.}$ (табл. 1): 15 °С (номинальный режим работы ГТУ) и -12 °С (средняя температура воздуха зимой в г. Кириши, Ленинградская обл.). Температура уходящих газов за ГТ поддерживалась постоянной $T_{г}^* = 530$ °С.

При изменении нагрузки от 50% до 100% КПД ГТУ возрастает на 6% (рис. 1), при этом значения коэффициентов избытка воздуха в камере сгорания понижаются.

Коэффициент запаса устойчивости, показывающий срыв потока воздуха в компрессоре, изменяется от 1,18 до 1,33, при этом границами предпомпажного состояния являются значения в пределах от 1,1 до 1,5. Поэтому в некоторых режимах работы ГТУ близка к срыву потока, что требует дополнительных исследований.

Таблица 1. Оценка влияния нагрузки на показатели ГТУ (при $T_{н.в.}=15\text{ }^{\circ}\text{C}/-12\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Технологический параметр	Электрическая мощность ГТ, МВт					
	282	254	225,5	197,5	169	141
Расход топлива, кг/с	14,3/ 14,4	13,3/ 13,4	12,1/ 12,2	10,9/ 11,0	9,8/ 9,9	8,8/ 8,9
Массовый расход воздуха, кг/с	696/ 726	650/ 682	602/ 634	554/ 584	506/ 534	457/ 480
Коэффициент избытка воздуха в КС в зоне охлаждения	2,62/ 2,71	2,63/ 2,74	2,69/ 2,79	2,74/ 2,85	2,78/ 2,88	2,79/ 2,90
Коэффициент избытка воздуха в КС в зоне горения	1,63/ 1,68	1,63/ 1,70	1,67/ 1,74	1,70/ 1,77	1,72/ 1,79	1,74/ 1,80
КПД ГТУ, %	39,5/ 39,7	38,5/ 38,8	37,4/ 37,7	36,1/ 36,4	34,8/ 35,2	33,6/ 33,7
Коэффициент запаса устойчивости	1,18/ 1,31	1,20/ 1,32	1,21/ 1,33	1,21/ 1,33	1,2/ 1,32	1,18/ 1,31

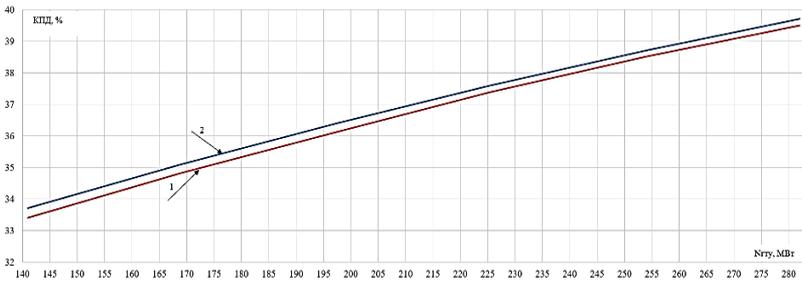


Рис. 1. Зависимость изменения КПД от мощности ГТУ:
1 – модель при $T_{н.в.} = +15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 – модель при $T_{н.в.} = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таким образом, разработанная математическая и имитационная модель позволяют оценивать основные показатели ГТУ в широком диапазоне нагрузок и изменяющихся климатических факторов. При этом модель оценивает изменения КПД, стабильность процесса горения в камере сгорания и коэффициент запаса устойчивости работы компрессора. Полученные результаты могут быть полезны при разработке эффективных систем автоматического управления ГТУ.

Литература

1. Муравьев И.К., Шинкевич Д.А. Разработка математической модели газотурбинной установки с малоэмиссионной камерой сгорания и особенности ее интеграции в среду SimInTech // Энергетические системы. 2022. № 1. С. 27–36.

2. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: Практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б.А. Карташов, Е.А. Шабаев, О.С. Козлов, А.М. Щекатуров. М.: ДМК Пресс, 2017. 424 с.

3. Введение в работу с программным обеспечением. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. Часть 1: учеб. пособие / ООО «ЗВ Сервис», 2017. – 109 с.

4. Муравьев И.К., Тверской Ю.С. Исследование на математической модели эффективности совместной работы газовой и паровой турбин энергоблока с ПГУ // Автоматизация в промышленности. – 2016. – № 1. – С. 53–57.

5. Газотурбинные энергетические установки: учебное пособие для вузов / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.С. Земцов, А.С. Осыка; под ред. С.В. Цанева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 428 с., ил.

УДК 621.438

И.К. МУРАВЬЕВ, к.т.н., доцент
М.О. МАНАКИНА, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: manakina_mo@mail.ru¹, igor3724@mail.ru²

Разработка теплогидравлической модели паровой турбины K-300-240 в среде SimInTech

Аннотация. В данной статье приводятся результаты разработки теплогидравлической модели паровой турбины K-300-240 в среде динамического моделирования технических систем «SimInTech». Выполнена оценка адекватности модели с использованием данных, взятых с режимной карты технологического объекта управления. Исследована работа турбины в рабочем диапазоне изменения нагрузок.

Ключевые слова: паровая турбина, система регулирования мощностью, моделирование, SimInTech.

I.K. MURAVYEV, candidate of technical sciences, docent,
M.O. MANAKINA, graduate student

Ivanovo State Power Engineering University, Department of Control Systems,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya 34
E-mail: manakina_mo@mail.ru¹, igor3724@mail.ru²

Development of a thermohydraulic model of the K-300-240 steam turbine in a SimInTech environment

Abstract. This article presents the results of the development of a thermal-hydraulic model of the steam turbine K-300-240 in the environment of dynamic modeling of technical systems "SimInTech". The adequacy of the model was assessed using data taken from the regime map of the technological control object. The operation of the turbine in the operating range of load changes was studied

Key words: steam turbine, power control system, simulation, SimInTech.

Моделирование энергетических объектов позволяет решать различные проблемы, возникающие в процессе жизненного цикла эксплуатации автоматизированного оборудования, например [1]:

- проводить исследования по синтезу автоматических систем регулирования для поддержания оптимального режима функционирования установки;
- изучать влияние режимных и климатических факторов на эффективность работы технологического оборудования;
- моделировать различные аварийные состояния, ситуации, повреждения и способы их устранения и предотвращения.

В данной работе объектом исследований является одновальная паровая турбина (ПТ) конденсационного типа с промперегревом К-300-240 филиала «Костромская ГРЭС» АО «Интер РАО - Электрогенерация».

В качестве средства имитационного моделирования выбрана отечественная среда разработки «SimInTech», которая позволяет создавать модели технических систем, алгоритмы и интерфейсы систем управления [2].

Расчетная модель (рис. 1) состоит из следующих блоков, которые находятся в подменю на вкладке «Теплогидравлика»:

- 17 блоков «HS - Канал» (подменю «Каналы») – с помощью данных блоков будет смоделированы трубопроводы между объектами;
- 17 блоков «HS - Внутренний узел» (подменю «Узлы») – с помощью данного блока будет смоделирован узел с переменными расчетными параметрами. Данный блок будет соединять трубопроводы и контролировать в них давление, энтальпию и температуру;
- 7 блоков «HS - Подпитка» (подменю «Узлы») – с помощью данного узла будут смоделированы паровые отборы.

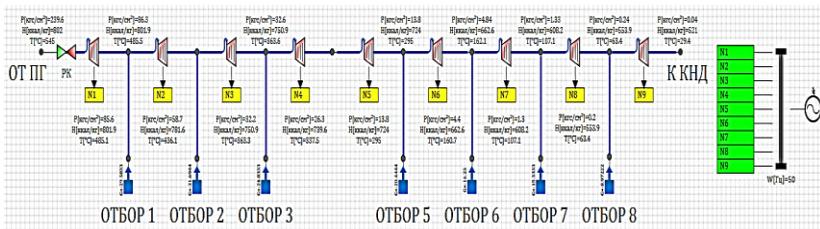


Рис. 1. Теплогидравлическая модель ПТ

Для исследования работы теплогидравлической модели ПТ в рабочем диапазоне с изменением электрической нагрузки с 330 МВт до 150 МВт проведем эксперимент с изменением степени открытия регулирующего клапана (табл. 1).

Проведем эксперимент на нагрузке 330, 300, 200 и 150 МВт. Степень открытия возьмем из табл. 1.

Таблица 1. Степень открытия клапана в рабочем диапазоне

Нагрузка	330 МВт	300 МВт	250 МВт	200 МВт	150 МВт
Степень открытия, %	85%	75%	60%	50%	40%



Рис. 2. График мощности при изменении степени открытия

Сравним изменение нагрузки с 330 МВт до 150 МВт, полученные по теплогидравлической модели, с режимной картой (РК) (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение данных РК с экспериментальными данными

Модель	330.1 МВт	299.8 МВт	249.7 МВт	200 МВт	150.3 МВт
Режимная карта	330 МВт	300 МВт	250 МВт	200 МВт	150 МВт
Погрешность	~0.02%	~0.05%	~0.12%	~0%	~0.2%

Согласно РК: давление пара за 6 ступенью ЦВД составляет 95.5 кг/см^2 , давление пара до ЦСД составляет 36.1 кг/см^2 , давление пара в деаэрактор составляет 8 кг/см^2 . По теплогидравлической модели К-300-240 получили: давление пара за 6 ступенью ЦВД 94.9 кг/см^2 , давление пара до ЦСД 35.96 кг/см^2 , давление пара в деаэрактор 8.06 кг/см^2 .

По результатам эксперимента максимальная относительная погрешность для электрической мощности ПТ составляет 0.2%, а для давления 0.75%.

Таким образом, результаты анализа проведенных исследований показали, что теплогидравлическая модель обладает достаточной точностью и может быть использована для решения задач оптимизации режима работы.

Литература

1. Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. Кн.3. Моделирование / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского; ИГЭУ. – Иваново, 2013. – Кн.2 – 436 с.
2. Среда динамического моделирования технических систем «SimInTech» Часть 1; ООО «ЗВ Сервис». – 2021. – 108 с.

УДК 621.438

А.Н. НИКОНОВ, к.т.н., доцент
Т.С. МИРОНОВА, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: tatyana_mironova00@mail.ru

Исследование способов моделирования теплоэнергетического оборудования ТЭС в среде SimInTech

Аннотация. В работе представлены результаты разработки модели конденсатора паровой турбины энергоблока ТЭС в среде SimInTech путем реализации уравнений математической модели объекта и с использованием встроенной библиотеки теплогидравлических элементов.

Ключевые слова: конденсатор, SimInTech, имитационная модель, теплогидравлическая модель.

A.N. NIKONOROV, candidate of technical sciences, docent,
T.S. MIRONOVA, graduate student

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: tatyana_mironova00@mail.ru

Research of methods for simulation of heat power equipment of TPP in the SimInTech environment

Abstract. The paper presents the results of the development of a model of a steam turbine condenser of a thermal power plant unit in the SimInTech environment by implementing the equations of a mathematical model of the object and using the built-in library of thermohydraulic elements.

Key words: condenser, SimInTech, simulation model, thermal hydraulic model.

Современные прикладные программы облегчают расчеты и процессы изучения различных технологических систем. В настоящее время просматривается тенденция импортозамещения на рынке инженерного программного обеспечения. Всё чаще появляются отечественные разработки [1]. Одной из удобных сред для моделирования теплогидравлических и гидродинамических процессов, происходящих на ТЭС, является программный комплекс SimInTech [2]. Это российская разработка с тщательно проработанным теплогидравлическим расчётным кодом, что является несомненным её плюсом.

При подготовке данных на проектирование технологических теплообменников требуется проведение оперативного анализа динамики процесса теплопередачи, определение теплообменной поверхности и габаритов аппарата.

Одним из путей решения этой проблема является использование моделей с высоким уровнем формализации. В такую модель включается минимальный набор реальных параметров теплообменников, который без учета многих частных особенностей позволяет оперативно и достаточно адекватно количественно оценивать динамику теплообмена и габаритные размеры аппарата.

В работе рассматриваются два способа разработки имитационной модели конденсатора паровой турбины энергоблока ТЭС. Основным назначением создаваемой модели является исследование алгоритмов управления уровнем конденсата в конденсационной установке.

В основу первого способа разработки имитационной модели конденсатора заложены базовые уравнения законов сохранения массы, энергии и количества движения для отдельных компонентов технологического объекта. Модель реализуется с помощью стандартных блоков арифметических операций и динамических преобразований (рис.1).

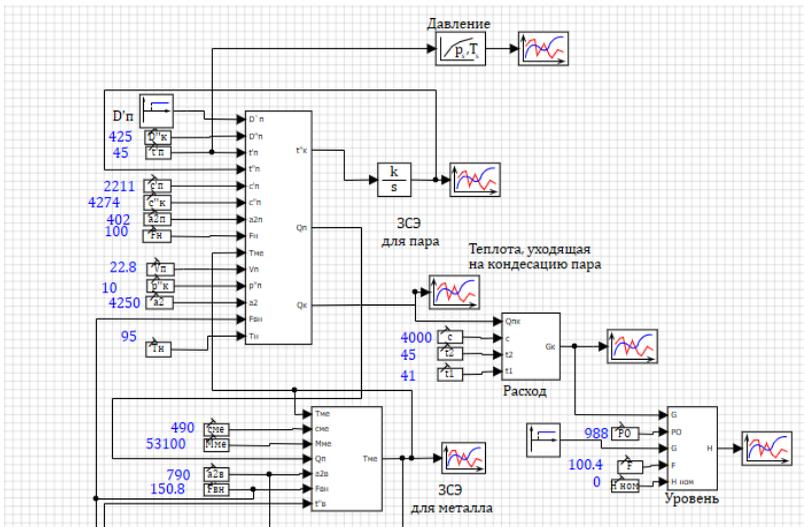


Рис.1. Фрагмент имитационной модели конденсатора паровой турбины

Также среда SimInTech предоставляет возможность создавать имитационные модели с помощью расчетного теплогидравлического кода (теплогидравлическая модель). Данный код является одномерным односкоростным кодом и предназначен для расчета теплогидравлических контуров произвольной топологии в приближении сжимаемой или несжимаемой среды [2].

В этом случае модель собирается из отдельных элементов, составляющих технологическую схему объекта: трубы, теплообменники, баки, насосы, задвижки и др. (рис.2).

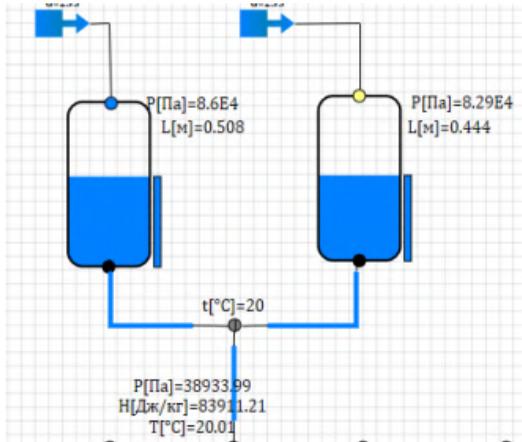


Рис. 2. Фрагмент теплогидравлической модели конденсатора паровой турбины

Каждый из двух подходов к реализации моделей имеет свои преимущества и недостатки. Так реализация имитационной модели стандартными блоками требует тщательной проработки исходной математической модели объекта, но является более надёжной в смысле получения желаемого результата. Теплогидравлическая модель более наглядная, но сложна в настройке отдельных элементов схемы.

С помощью созданных моделей можно решать задачи по оптимизации работы оборудования, изучать влияние геометрии и конструкции конденсатора на технологические параметры, исследовать динамику процессов, происходящих в конденсаторе.

Результаты работы позволяют сделать вывод, что программный комплекс SimInTech позволяет разрабатывать высокоточные динамические модели сложных технологических объектов как в общем виде, так и в теплогидравлическом.

Литература

1.Импортозамещение в области “тяжелых” САПР: мнение специалиста. Integral [Электронный ресурс] / Режим доступа <https://integral-russia.ru/2017/09/23/importozameshhenie-voblasti-tyazhelyh-sapr-mnenie-spetsialista/>, свободный – (дата обращения: 11.04.2023).

2.Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. Часть 1 / ООО «ЗВ Сервис», 2021. – 108 с.

УДК 53.082.7

Е.Д. МАРШАЛОВ, к.т.н., доцент,
А.В. ГОЛУБЕВ, к.т.н., доцент
Е.А. КУЗНЕЦОВА, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, Рабфаковская 34

E-mail: evgeny.marshalov@gmail.com, ktyakyznetzova15e@mail.ru

Исследование нештатных ситуаций в работе контрольно-измерительного оборудования

Аннотация. В работе приведены результаты экспериментов, связанных с нештатными ситуациями, которые могут возникнуть в работе с контрольно-измерительным оборудованием.

Ключевые слова: нештатные ситуации, контрольно-измерительный прибор

E.D. MARSHALOV, Candidate of Technical Sciences, associate Professor,
A.V. GOLUBEV, Ph.D., Candidate of Technical Sciences, associate Professor t
E.A. KYZNETSOVA, student

Ivanovo State Power University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya 34

E-mail: evgeny.marshalov@gmail.com, ktyakyznetzova15e@mail.ru

Investigation of abnormal situations in the operation of control and measuring equipment

Abstract. The paper presents the results of experiments related to abnormal situations, which may arise in the work with control and measuring equipment.

Key words: abnormal situations, control and measuring equipment

Нарушение условий эксплуатации измерительного оборудования, неправильный выбор режима работы приборов, отказы и многое другое – нештатные ситуации, которые могут возникнуть на предприятии. Нештатные ситуации, возникающие в измерительных каналах в настоящее время не систематизированы, а их алгоритм поиска и устранения не формализован.

Возникновение и регистрация нештатной ситуации не является свидетельством выхода из строя измерительного оборудования и не может служить для оценки его метрологических характеристик, а является поводом для определения причин, ее вызвавших.

Нештатные ситуации, возникающие в измерительных каналах в настоящее время не систематизированы, а их алгоритм поиска и устранения не формализован. Соответственно, ставится задача исследования и обнаружение причин, вызывающие искажение информации.

В работе рассмотрен измерительный канал АСУТП, состоящий из измерительного прибора ИРТ 5930Н, первичного измерительного преобразователя (термопары), калибратора температуры, кабеля и сети. Схема представлена на рис. 1.

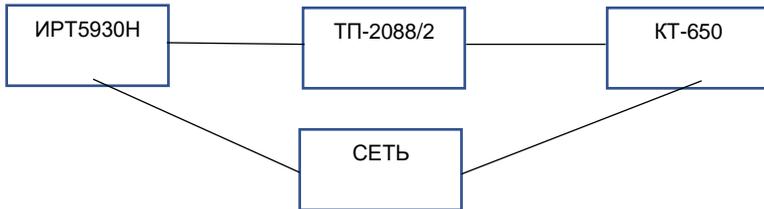


Рис. 1. Схема испытаний термопары и вторичного прибора

Заданное значение температуры = 100 градусов. В помещении примерно 21-23 градуса тепла.

Было проведено несколько опытов с данной цепью. А именно:

1. Снятие показаний с датчика при нормальных условиях (отсутствии нештатных ситуаций)
2. Инверсия на полюсах на термопаре
3. Инверсия полюсов и на термопаре, и на контрольно-измерительном приборе
4. Короткое замыкание на измерительных контактах вторичного прибора.

Во время проведения данных экспериментов снимались показания температуры, тока цепи, сопротивление термопары, напряжение термопары, сопротивление цепи, напряжение цепи. Сравнение характеристик полученных результатов представлено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение характеристик

Измеряемый параметр / условия эксплуатации	Норм. условия	Инверсия полюсов на ТП	Инверсия полюсов и на ТП и ВП	Закоротили прибор
Температура, T, °C	100	-57	96,5	22,8-23,5
Ток цепи, I, А	5*10 ⁻⁶	-	-	-
Напряжение цепи, U, мВ	3	2,9	3	0
Сопротивление цепи, R, Ом	46,5	46	46	2,6
Напряжение термопары, U _t , мВ	3	2,9	3	3
Сопротивление ТП, R _t , Ом	18	17,5	17,6	17,5

Как видно из данной таблицы, что при изменении полюсов термопары в неправильное положение, температура становится отрицательной.

При этом, зная температуру окружающей среды (помещения) можно предположить, что по модулю сумма температуры при инверсии полю-

сов на термопаре и помещения даст заданное значение температуры (примерно).

Также можно заметить, что в случае, когда закоротили прибор, была показана температура, примерно равная температуре помещения. И во время проведения этого опыта напряжение цепи равно 0, что характерно для данного случая.

Вывод: таким образом, в случае, когда датчик выдает отрицательную температуру при заданной положительной, необходимо проверить правильность установки полюсов на термопаре. Когда прибор показывает температуру, в несколько раз ниже, чем заданная, можно говорить о коротком замыкании в контрольно-измерительном приборе.

Литература

1. Шмерин Г.М. Нештатные ситуации управления контрольно-измерительными приборами и системами. // Материалы научно-техн. конф. "Апробация комплексов технич. средств автоматизации науч.-исслед. процессов", Омск, 2004, Т.2, с. 80-82.

2. Данилов Ю.А., Чернышев С.А. Проектирование систем контроля и управления нештатными ситуациями на многотехнологическом производстве. // Автоматика и телемеханика, 2002, № 8, с. 140-149.

3. Буслов А.И., Ковалев А.Б., Карпов В.А., Костина Л.А. Контрольно-измерительные приборы и системы в нештатных ситуациях. // ТЕКСТУМ, Москва, 2011, №1, с. 73-80.

4. Загаринский В.И., Брановицкий В.Н. Автоматизация контроля и управления опасными производственными объектами в условиях нештатных ситуаций. // Автоматика и телемеханика, 2003, №3, с. 53-60.

5. Латкевич С.С., Зыков А.В., Котельников А.Е. Противодействие человеческому фактору и техническим нештатным ситуациям на объектах нефтехимической промышленности. // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2005, Т.56, № 5, с. 269-276.

УДК 53.082.7

Е.Д. МАРШАЛОВ, к.т.н., доцент
Е.А. МИХАЙЛОВ, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, Рабфаковская 34
e-mail: evgeny.marshalov@gmail.com, egorun800@yandex.ru

Определение и анализ динамических свойств датчиков температуры

Аннотация. В данной статье рассмотрены характеристики датчиков температуры, а именно их динамические свойства. Изучена зависимость динамических характеристик датчика от его геометрических характеристик, типа чувствительного элемента, и др.

Ключевые слова: датчик температуры, динамические свойства.

E. D. MARSHALOV, Ph.D.,
E. A. MIHAILOV, student

Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya 34
E-mail: evgeny.marshalov@gmail.com, egorun800@yandex.ru

Determination and analysis of dynamic properties of temperature sensors

Annotation. This article discusses the characteristics of temperature sensors, namely their properties. The dependence on its geometric characteristics, the type of sensitive element, etc. has been studied.

Key words: temperature sensor, dynamic properties

Цель исследования: определить динамические характеристики датчиков температуры.

Для определения динамических характеристик проводилась серия экспериментов, в которой подавали единичное ступенчатое воздействие на датчики.

В работе использовались два калибратора температуры: КТ-110 и КТ-650, регистратор сигналов РМТ-59 и набор датчиков разных видов (таблица), с разными геометрическими характеристиками и имеющие различные НСХ.

Таблица. Основные параметры датчиков:

Название	НСХ	Номер	Диаметр ЧЭ, мм
ТС-1088/4	Pt100x2 (-50...350°C)	№9480	10
ТП-0198/2	ХК(L) (-40...600°C)	№1122	4
ТС-1388/5	100П/В/3 (-50...350°C)	№10296	6
ТС-1388/5	100П/В/3 (-50...200°C)	№10300	4
ТС-1088/5	100П/И/3 (-50...350°C)	№6781	8
ТС-1088/5	100П/И/3 (-50...350°C)	№6783	10

План эксперимента:

1. Подаем единичное ступенчатое воздействие на датчики путем помещения чувствительного элемента сначала в калибратор с установленным значением температуры в 0°C, а затем перестановкой в калибратор с 50°C.

2. Проводим опыт, в котором погружаем датчики из 50°C в 0°C, т.е. получаем реакцию на обратное единичное ступенчатое воздействие.

3. Выгружаем данные с регистратора на компьютер.

4. Обрабатываем данные для последующего построения графиков.

Как только мы выгружаем данные с регистратора мы получаем таблицу excel с множеством точек, приводим данные к виду, удобному для построения графиков. Далее строим графики по полученным данным.

Полученные характеристики:

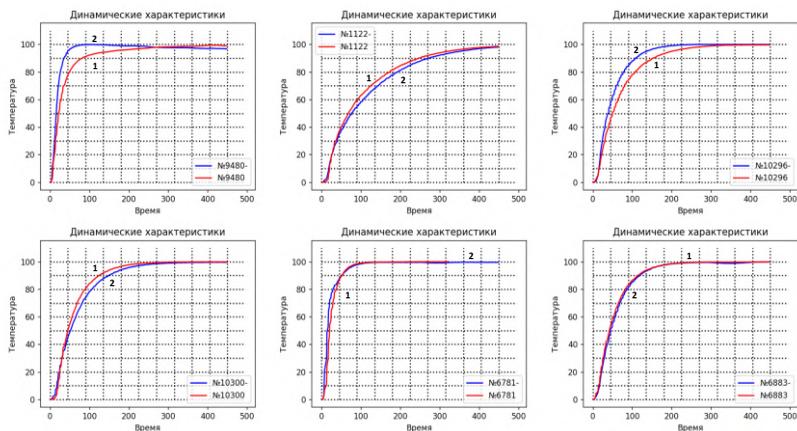


Рис.1 динамические характеристики датчиков
 1 – реакция на включение единичного ступенчатого воздействия;
 2 – реакция на выключение единичного ступенчатого воздействия

Из графиков видно, что не все датчики одинаково реагируют на подачу единичного ступенчатого воздействия. При этом никакой явной зависимости от типа датчика, либо НСХ не проглядывается. Но существует зависимость между диаметром чувствительного элемента и временем установления процесса.

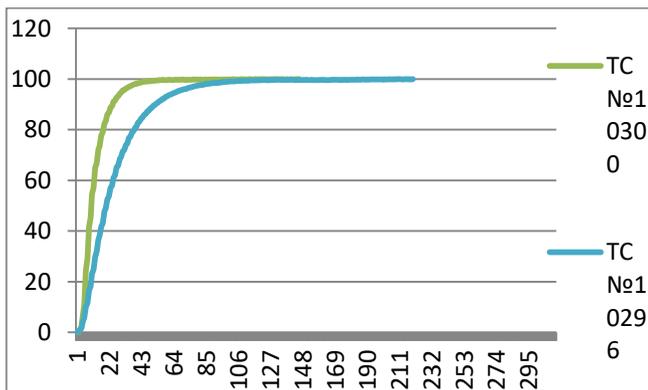


Рис.2 Сравнение характеристик датчиков с разными диаметрами монтажных частей

Из приведенного выше графика видно, что датчики с одинаковыми НСХ, но разными диаметрами реагируют на воздействие по-разному.

Чем больше диаметр монтажной части, тем дольше идет процесс установления процесса.

Анализируя полученные результаты, можем сделать вывод, что при прочих равных в зависимости от характера среды и протекания процессов в этой среде мы можем подбирать датчики не только по диапазону измерения, требуемой точности и т.д., но еще и по скорости характеру реакции датчика на изменение измеряемой величины.

Литература

1. Маршалов Е.Д., Никоноров А.Н., Муравьев И.К. Определение времени термической реакции термопреобразователей сопротивления // Вестник ИГЭУ. 2017. №3. С.54-59.
2. Маевски Я. Динамические характеристики ёмкостных датчиков влажности. Приборы и методы измерений. 2020; С.53-59.
3. Епифанов С.В. Идентификация динамических характеристик термопар по результатам испытаний двигателей / С.В. Епифанов, С.И. Суховой, А.В. Шпилевой // Авиационно-космическая техника и технология. 2009. №9 (66). С. 166-171.

УДК 330.4

М.Ю. ТВЕРСКОЙ, к.т.н., доцент

НИУ «Высшая школа экономики – Высшая школа бизнеса»,
119049 г. Москва, ул. Шаболовка, 26, стр. 1.
E-mail: TverskoyMY@kenguru.ru

Автоматизация процесса управления торговыми запасами как основа эффективности современных форматов ритейла

Аннотация. В статье рассматриваются современные подходы к формированию товарных запасов применительно к сети непродовольственных магазинов и представлены мероприятия по повышению эффективности данного процесса.

Ключевые слова: товарный ассортимент, товарный запас, оборачиваемость, цикл поставки, витринный запас.

M.Yu. TVERSKOY, Ph.D., Associate Professor

NRU «Higher School of Economics - Graduate School of Business»,
119049 Moscow, Shabolovka street, 26, Building 1,
E-mail: TverskoyMY@kenguru.ru

Automation of the process of trading stock management as a basis for the efficiency of modern retail formats

Abstract. The article discusses modern approaches to the formation of inventory in relation to the chain of non-food stores and presents measures to improve the efficiency of this process.

Key words: product range, inventory, turnover, delivery cycle, display stock.

Управление товарными запасами для торгового оператора является в настоящее время одним из основных маркеров, дающих оценку его операционной эффективности. Большинство продаваемых товарных пози-

ций в непродовольственных магазинах нельзя отнести к категории FMCG (Fast Moving Consumer Goods, быстрооборачиваемые потребительские товары). Известно, что к данной группе товаров традиционно относят упакованные производителем товары повседневного спроса: продукты питания, бытовая химия, личная гигиена [1]. Основная особенность потребительских товаров FMCG – высокая оборачиваемость.

Однако большинство непродовольственных товаров имеют гораздо меньшую оборачиваемость и, следовательно, худшую прогнозируемость продаж на рынке. В литературе по управлению торговлей концепция продажи таких товаров получила название «длинный хвост» [2, 3].

Поэтому перед ритейлером стоит достаточно нетривиальная задача: необходимо спрогнозировать такой товарный запас в магазине, который бы, с одной стороны удовлетворял требуемому уровню сервиса с точки зрения желания покупателя и минимизировал вероятность упущенных продаж из-за товарного дефицита, а, с другой стороны, позволял бы иметь показатели оборачиваемости товарных запасов, обеспечивающих требуемое значение нормы прибыли торгового оператора.

Для определения оптимального товарного запаса, рассмотрим использование различных математических алгоритмов и построения на их основе система автоматизации управления товарными запасами.

Оптимизация товарного остатка в магазине происходит на основе сравнения и стоимостной оценки следующих параметров:

- затраты на набор товара в распределительном центре торгового оператора;
- стоимости товарного кредита за фактические остатки в розничном магазине;
- удобства при транспортировке (хрупкий товар надежнее вести упаковкой);
- графика поставки в магазин.

В результате формируется автоматическая выписка на магазины – автоматическая процедура расчета потребности магазинов в товарах, выполняемая каждый день в ИС на основании критериев выписки в соответствие с графиком завоза.

Управление товарными запасами осуществляется на основе товарной матрицы розничного магазина и оптимизировано по блокам товаров.

Блок товаров – выделенный в рамках товарной матрицы набор ассортимента, оптимизированный в соответствии с требованиями локального рынка и возможностями мерчендайзинга, с целью наиболее полного удовлетворения потребности Покупателя.

Потребность в товарных остатках определяется на основе истории продаж с учетом особенностей поведения товарной категории, к которой принадлежит товар.

При этом выделяются следующие параметры для автоматизированного расчета:

Рекомендуемый остаток - показатель, который влияет на выписку новых товаров и товаров, которых не было на остатках в РМ последние

30 дней. При первой выписке товаров в магазин поедет количество равное рекомендуемому остатку, чтобы при наличии активного спроса быстрее «разогнались» расчетные показатели.

Процент сервиса – процент покупателей, потребность которых мы готовы удовлетворить полностью. Для большинства товаров группы «А» установлен уровень сервиса, равный 90%, т.е. мы готовы держать остаток в магазине достаточный для удовлетворения 90% покупателей этого товара.

Разовая покупка (РП) – максимальное количество единиц товара, покупаемое одним чеком определенным процентом покупателей. Или количество товаров необходимое для удовлетворения потребности в разовой покупке при выполнении определенного процента сервиса. Параметр является расчетным, определяется за предыдущий период до 90 дней для формата магазина.

Дневная покупка (ДП) - максимальное количество единиц товара, покупаемое в течение одного дня определенным процентом покупателей. Или кол-во товаров необходимое для удовлетворения потребности в дневной покупке при выполнении определенного процента сервиса. Параметр является расчетным, определяется за предыдущий период до 90 дней.

Неснижаемый остаток - минимальное количество товара, достаточное для совершения разовой покупки.

Коэффициент востребованности – коэффициент, который показывает частоту покупок. Определяется как отношение дней покупок к общему количеству присутствия товара в магазине.

Витринный минимум (ВМ) - минимальное количество товара, достаточное для совершения разовой покупки покупателем и определяется экспертно.

Информационная система рассчитывает на дату поставки разовую покупку и дневную покупку с учетом востребованности и сравнивает их с витринным минимумом. Из полученного ряда выбирается максимальное значение, как показано в (1).

$$\text{Заказ} = [\text{MAX}(\text{ВМ}; \text{ДП}; \text{РП}) - \text{O}] \quad (1)$$

где O – остаток на текущую дату; [] – округление до упаковки.

Таким образом, подобный подход позволяет совместить экспертный анализ товарных запасов при первоначальном завозе в магазин и, в дальнейшем его корректировать на основе истории текущих продаж с учетом установленного уровня сервиса – плановый уровень удовлетворенности покупателя.

Литература

1. ACNielsen; Heller, Al. Consumer-Centric Category Management. Wiley. Kindle Edition.
2. Anderson C. The Long Tail // Wired Magazine, 2004. October.
3. Крис Андерсон. Длинный хвост. Новая модель ведения бизнеса //Вершина, Москва, 2008

СЕКЦИЯ 6.

«ТЕПЛОВЫЕ И АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»

Подсекция

«ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»

УДК 621.311.22

О.А. ЕВДОКИМОВ, аспирант
В.Д. БУРОВ, к.т.н., проф.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, г. Москва, Красноказарменная улица, 14
E-mail: EvdokimovOA@yandex.ru

Оценка влияния испарительной установки на экономичность энергоблока ПГУ-420Т

Аннотация. В работе приведены результаты расчета тепловой схемы энергоблока ПГУ-420Т с включенной испарительной установкой, охлаждающей цикловой воздух на входе в компрессор ГТУ, оценка её влияния на КПД ГТУ и энергоблока в целом.

Ключевые слова: парогазовая установка, ПГУ, газотурбинная установка, ГТУ, испарительная установка, охлаждение воздуха ГТУ

O.A. EVDOKIMOV, postgraduate
V.D. BUROV, Ph.D., Professor

Moscow Power Engineering Institute
111250, Moscow, Krasnokazarmennay ulica, 14
E-mail: EvdokimovOA@yandex.ru

Evaporative cooler impact estimation on the CCGT-420T power unit efficiency

Abstract. The paper presents the results of calculating the CCGT-420T power unit cycle diagram with a evaporative unit cooling gas turbine compressor inlet air, estimation of its impact on the gas turbine and power unit efficiency.

Key words: combine cycle gas turbine, CCGT, gas turbine, evaporative cooler, inlet air cooling

В российской энергосистеме введено в эксплуатацию более 40 парогазовых и газотурбинных энергоблоков, в числе которых 10 моноблоков и 2 дубль-блока работают на базе газотурбинной установки SGT5-4000F производства компании «Siemens». В работе рассматривается один из способов повышения экономичности газотурбинной установки – охлаждение циклового воздуха на входе в компрессор ГТУ с естественным испарением воды на примере энергоблока ПГУ-420Т, который находится в эксплуатации на ТЭЦ-16 ПАО «Мосэнерго». В состав энергоблока вхо-

дят газотурбинная установка SGT5-4000F, паровая турбина SST5-5000 с двумя теплофикационными отборами и трехконтурный котел-утилизатор «ЭМАльянс».

Испарительные кассеты установлены в «грязном» отсеке комплексного воздухоочистительного устройства (КБОУ) ГТУ между антимоскитными сетками и влагоотделителями. Далее по потоку следуют фильтры грубой и тонкой очистки воздуха. Вода равномерно распределяется по пористым кассетам, испаряется и охлаждает проходящий через них воздух. Пределом охлаждения является точка росы. В зависимости от температуры и влажности наружного воздуха эффективность испарительного охлаждения может изменяться в разы: она максимальна в сухую и жаркую погоду, а во время дождя – вовсе стремится к нулю [1,2]. Задача работы – оценить эффективность испарительной установки (ИУ) в условиях климата г. Москвы.

Были проанализированы показания датчиков измерения температуры и относительной влажности наружного воздуха, установленные на энергоблоке ПГУ-420Т, и получена зависимость значения среднестатистической влажности от температуры наружного воздуха. Максимальная средняя влажность 73–75% наблюдается при переходе через отметку 0°C, и по мере роста температуры влажность снижается: при +10°C влажность равна 66%, при +20°C – 55%, при +30°C – 39%. В программном комплексе «Thermoflow» был выполнен расчет тепловой схемы энергоблока с включенной и отключенной испарительной установкой в диапазоне температур от +12 до +30°C (испарительная установка включается в работу при +12°C, а верхний предел +30°C выбран исходя из фактических температур, характерных для климата г. Москвы). Тепловая нагрузка значительно влияет на технико-экономические показатели ПГУ-ТЭЦ, поэтому во всех вариантах она принята постоянной, согласно графику теплосети.

В результате использования испарительной установки удастся снизить температуру воздуха перед компрессором (рис. 1,а) на величину от 3,5 до 9,5°C и повысить электрическую мощность энергоблока (рис. 1,б) на 7,7–20,9 МВт. Основная часть 6,8–18,6 МВт приходится на газовую турбину и ведет к повышению расхода топлива. КПД ГТУ повышается на 0,21 – 0,55% (рис.2,а). При этом снижается температура и повышается расход выхлопных газов ГТУ, как следствие снижается температура и повышается расход перегретого пара высокого давления и пара промежуточного перегрева. Электрическая мощность паровой турбины растет на 0,9–2,3 МВт, однако из-за снижения температур дымовых газов и пара КПД паротурбинной части ПГУ (общий КПД паровой турбины и котла утилизатора) снижается на 0,05–0,36%. КПД энергоблока ПГУ-420Т (брутто) в зависимости от температуры наружного воздуха при использовании испарительной установки снижается на 0,33–1,40% (рис. 2,б). Это, прежде всего, связано с повышением доли выработки электроэнергии на ГТУ и снижением доли паровой турбины, ведь паровая турбина исполь-

зует сбросное тепло выхлопных газов, а рост мощности ГТУ требует повышения расхода топлива.

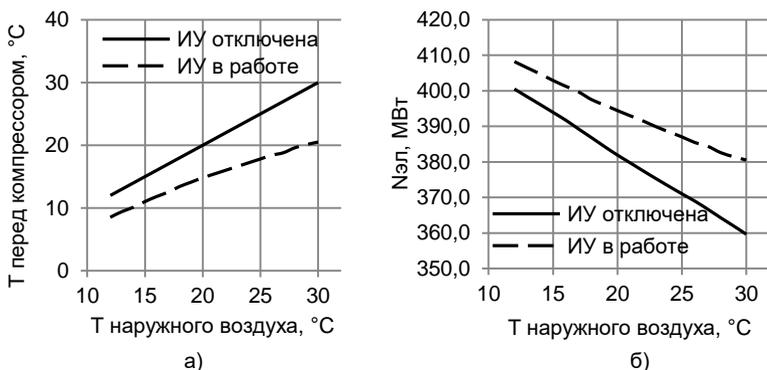


Рис.1. а – зависимость температуры воздуха перед компрессором ГТУ от температуры наружного воздуха; б – зависимость электрической мощности ПГУ-420Т от температуры наружного воздуха

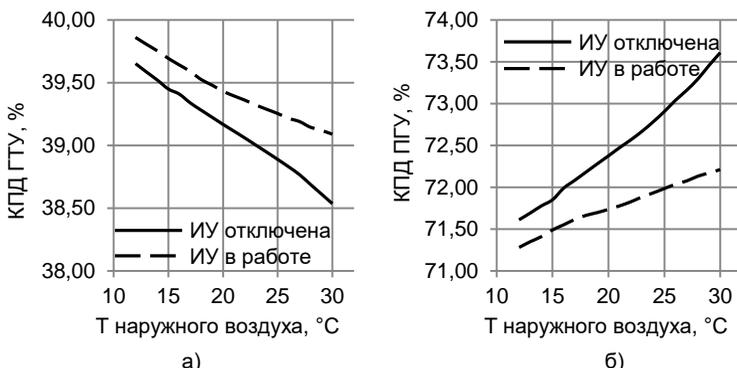


Рис.2. а – зависимость КПД ГТУ SGT5-4000F от температуры наружного воздуха; б – зависимость КПД ПГУ-420Т от температуры наружного воздуха

Вывод: применение испарительной установки в летнее время для охлаждения циклового воздуха перед компрессором ГТУ позволяет повысить электрическую мощность энергоблока ПГУ-420Т, однако снижает его экономичность. Окончательное решение – вопрос технико-экономической оптимизации.

Литература

1. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учебное пособие для вузов / Под ред. С.В. Цанева – М.: Издательство МЭИ, 2002.

2. О. А. Евдокимов, В. Д. Буров. Система охлаждения воздуха на всасе компрессора ГТУ SGT5-4000F с естественным испарением воды. Радиозлектроника, электротехника и энергетика: 27-я Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. Докл. – М. 2021. С. 918

УДК 621.311.22

В.Д. БУРОВ, к.т.н., профессор,
О.В. НЕКРАСОВ, техн. директор ООО «МЭП»,
С.Д. КОЖУХАРЬ, исп. директор ООО «МЭП»

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, Красноказарменная улица, 14
E-mail: burovvd@mail.ru

Общество с ограниченной ответственностью «Мосэнергопроект» (ООО «МЭП»)
105066, г. Москва, ул. Спартаковская, д.2а, стр.2
E-mail: NekrasovOV@mep.ru, KozhukharSD@mep.ru

Опыт проектирования современных ПГУ ТЭС

Аннотация. Рассмотрение вопросов проектирования парогазовых технологий на российских ТЭС.

Ключевые слова: парогазовый энергоблок, газотурбинная установка, котел-утилизатор, главный корпус.

V.D. BUROV, Ph.D., Professor,
O.V. NEKRASOV, technical director LLC «MEP»,
S.D. KOZHUKHAR, EXECUTIVE director LLC «MEP»

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
111250, Moscow, Krasnokazarmennay ulica, 14
E-mail: burovvd@mail.ru

Limited Liability Company «MOSENERGOPROJECT» (LLC «MEP») 105066,
Moscow, Russian Federation, Spartakovskaya st., 2a bld, 2,
e-mail: NekrasovOV@mep.ru, KozhukharSD@mep.ru

Experience in designing modern CCGT TPPS

Abstract. Consideration of issues of designing gas-steam cycle technologies at Russian TPPs.

Key words: combined cycle gas turbine unit, gas turbine unit, heat recovery boiler unit, main building.

В XXI веке в России на ТЭС стали реализовываться проекты с использованием парогазовых технологий. ООО «МЭП» принимал участие (на различных стадиях) в разработке 9 проектов ПГУ ТЭС: ТЭЦ-26 – ПГУ- 420Т; ТЭЦ-27 – два ПГУ-450Т; ТЭЦ-21 – ПГУ-450Т; Адлерская ТЭС – два ПГУ-180Т; Серовская ГРЭС – ПГУ-420; ТЭЦ-16 – ПГУ-420Т;

ТЭЦ-20 – ПГУ-420Т; Грозненская ТЭС – две ГТУ-180 (SGT5-2000E (SIEMENS)); ТЭЦ-12 – ПГУ-220Т. За исключением Адлерской ТЭС и Грозненской ТЭС проекты реализовывались на территории действующих ТЭС без их остановки.

Следует отметить, что для проектов ТЭС с применением парогазовой технологии в российских условиях, характерна большая доля их индивидуальности. Это объясняется большим разнообразием типов применяемых ГТУ (в 9 проектах 6 типов ГТУ), а также типом ТЭС (КЭС, ТЭЦ, ГТУ открытого типа). Отдельный вопрос – применение новых парогазовых энергоблоков в пределах генпланов существующих ТЭС. В каждом проекте также есть особенности в разработанных тепловых и технологических схемах, в выборе типов котлов-утилизаторов, паровых турбин и вспомогательного оборудования. В проектах применены разные подходы к размещению оборудования в главных корпусах ТЭС.

На трех парогазовых энергоблоках (ТЭЦ-20, ТЭЦ-16 и ТЭЦ-12) после реализации проектов ООО «МЭП» спроектировал размещение в КБОУ ГТУ специальных испарительных установок с целью увеличения мощности энергоблоков при высоких температурах наружного воздуха [1,2].

О некоторых особенностях проектов ПГУ ТЭС.

На Грозненской ТЭС, где установлены 2 ГТУ SGT5-2000E (SIEMENS) в открытом цикле, впервые в России выполнен проект с возможностью, в дальнейшем, расширения до парогазового блока с байпасной дымовой турбины и установкой паровой турбины в отдельном здании.

На Адлерской ТЭС, которая реализовывалась по постановлению Правительства РФ по программе строительства олимпийских объектов, установлено два дубль-блочных парогазовых энергоблока на базе ГТУ V64.3A (ANSALDO). Проектом предусмотрена установка ГТУ и котлов-утилизаторов на открытой площадке, а установка паровых турбин – в главном корпусе. Вспомогательное оборудование ГТУ установлено в закрытых зданиях. В системе технического водоснабжения – сухая градирня вентиляторного типа. Все оборудование, установленное на площадке ТЭС, удовлетворяет требованиям по сейсмостойкости – 9 баллов включительно по шкале MSK-64.

На ТЭЦ-16 установлен моноблочный теплофикационный парогазовый энергоблок на базе ГТУ SGT5-4000F (SIEMENS) с трехконтурным горизонтальным котлом-утилизатором с естественной циркуляцией и паровой турбиной SST5-5000 (SIEMENS). Проектом предусмотрено установка двух сетевых подогревателей, работающих на отборном паре паровой турбины и паре низкого давления котла-утилизатора. Размещение основного, вспомогательного оборудования, щита управления блоком и электротехнические помещения – в новом главном корпусе.

Для размещения теплофикационного парогазового энергоблока ПГУ-220Т на ТЭЦ-12 спроектировано новое здание главного корпуса, с поперечным размещением ГТУ и паровой турбины. В качестве ГТУ применена ГТЭ-160 (“Силовые машины”), котел-утилизатор – вертикальный, двух

давлений с принудительной циркуляцией. В системе технического водоснабжения установлена сухая вентиляторная градирня с увлажнением фирмы S.P.I.G.

Перечень проектов и основного оборудования в разработанных проектах парогазовых энергоблоков приведен в табл. 1.

Таблица 1. Перечень проектов по ПГУ и ГТУ ТЭС

Объект проекта \ Наименование	Наименование основного оборудования	Особенности проекта
ТЭЦ-27, ТЭЦ-21 - филиал ПАО «Мосэнерго» ПГУ-450Т Теплофикационный Дубль-блок	2хГТЭ-160 МВт (ЛМЗ) 1 ПТ Т-125/150-7,4 (ЛМЗ) КУ П-107 (ОАО «ЗиО»)	1. КУ вертикальный, двухконтурный. 2. Отличие компоновки ТЭЦ-21 и ТЭЦ-27 – подвальная и бесподвальная соответственно
Адлерская ТЭС - филиал ПАО «ОГК-2» 2хПГУ-180 МВт Два Теплофикационных Дубль-блока	2ГТ - V64.3A (Ansaldo Energy) ПТ Т-48/62- 7, 4/0,12 (ОАО «Калужский турбинный завод») КУ Еп-99,6/14,5-7,71/0,55-545/212 (ОАО «ЗиО»)	1. КУ горизонтальный, двухконтурный. 2. Открытая компоновка ГТ и КУ 3. Применены выносные пиковые бойлера в ГК
Серовская ГРЭС бл.. 9,10 – филиал ПАО «ОГК-2» ПГУ-420 Конденсационный Моно-блок одновальный	ГТ SGT5-4000F (Siemens) ПТ SST5-3000 (Siemens) КУ Еп-270/316/46-12,5/3,06/0,46-560/560/237 (ОАО "ЭМАльянс")	1. КУ горизонтальный, трехконтурный
ТЭЦ-16 филиал ПАО «Мосэнерго» ПГУ-420Т Теплофикационный Моноблок двухвальный	ГТ SGT5-4000F (Siemens) ПТ SST5-5000 (Siemens) КУ Еп-264/297/43-13,0/3,0/0,47- 558-558-237-11,6вв (ОАО "ЭМАльянс")	1. КУ горизонтальный, трехконтурный. 2. ПТ и ГТ расположены параллельно, вывод мощности в одну сторону
ТЭЦ-20 – филиал ПАО «Мосэнерго» ПГУ-420Т (ОБИН) Теплофикационный Моноблок двухвальный	ГТ SGT5-4000F (Siemens) ПТ SST5-3000 (Siemens) КУ Еп-264/297/43-13,0/3,0/0,47- 558-558-237-11,6вв (ОАО "ЭМАльянс")	1. КУ горизонтальный, трехконтурный. 2. ПТ и ГТ располагаются напротив друг друга, вывод мощности в разные стороны
Грозненская ТЭС – Филиал ПАО «ОГК-2» 2хГТУ-180 Работа ГТУ открытом цикле	ГТ SGT5-2000E (Siemens) МВт	1. Предусмотрена возможность расширения до ПГУ (2 этап) с байпасной дымовой трубой и дивертором. ПТ располагается в отдельном здании, паропроводы проложены по эстакаде
ТЭЦ-26 филиал ПАО «Мосэнерго» ПГУ-420Т Теплофикационный Моноблок двухвальный	GT-26 (ALSTOM)	1. КУ горизонтальный, трехконтурный 2. ПТ и ГТ расположены параллельно, вывод мощности в одну сторону

ТЭЦ-12 - филиал ПАО «Мосэнерго»	1 ГТ ГТЭ-160 МВт (ОАО «Силовые машины») 1 КУ ПК-74 (ОАО «ЗиО») 1 ПТ Т-56/73-7,8-0,04 (ОАО «Калужский бинный завод») тур	1. КУ вертикальный, двух- контурный. 2. ПТ и ГТ расположены параллельно, вывод электри- ческой мощности в одну сторону по ряду «А» машин- ного отделения на пристанци- онный узел 3. Бесподвальная компоновка
------------------------------------	--	---

Литература

1. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций/ С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов. - М.: Издательство МЭИ, 2002. – 548 с.

2. Богдан А.Р., Быличкин В.И., Буров В.Д. Повышение экономичности ГТУ путем охлаждения циклового воздуха на входе в КВОУ. – Турбины и дизели. 2020, №5. с. 20–24.

УДК 621.311.22

В.Д. БУРОВ, к.т.н., профессор,
О.В. НЕКРАСОВ, технический директор ООО «МЭП»,
С.Д. КОЖУХАРЬ, исполнительный директор ООО «МЭП»

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, Красноказарменная улица, 14
E-mail: burovvd@mail.ru,

Общество с ограниченной ответственностью «Мосэнергопроект» (ООО «МЭП»)
105066, г. Москва, ул. Спартаковская, д.2а, стр.2
E-mail: NekrasovOV@mep.ru, KozhukharSD@mep.ru

Реконструкция паросилового энергоблока с турбиной Т-250/300-240

Аннотация. Рассмотрены вопросы реконструкции энергоблока на базе турбины Т-250/300-240 в условиях действующей ТЭС. Приведены основные технические решения по размещению нового оборудования в существующем главном корпусе ТЭС.

Ключевые слова: паросиловой энергоблок, турбоустановка, котлоагрегат, главный корпус.

V.D. BUROV, Ph.D., Professor,
O.V. NEKRASOV, technical director LLC «MEP»,
S.D. KOZHUKHAR, executive director LLC «MEP»

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
111250, Moscow, Krasnokazarmennay ulica, 14
E-mail: burovvd@mail.ru

Limited Liability Company «MOSENERGOPROJECT» (LLC «MEP»)
105066, Moscow, Russian Federation, Spartakovskaya st., 2a bld, 2,
e-mail: NekrasovOV@mep.ru, KozhukharSD@mep.ru

Reconstruction of a power unit based on the T-250/300-240 turbine

Abstract. The issues of reconstruction of a power unit based on the T- 250/300-240 turbine under the conditions of an operating thermal power plant are considered. The main technical solutions for the placement of new equipment in the existing main building of the thermal power plant are given.

Key words: steam power unit, turbine plant, boiler unit, main building.

Энергоблоки на базе турбины Т-250/300-240 являются самыми мощными теплофикационными энергоблоками в России. Первый энергоблок был построен в 1970 году. Всего в период СССР на одиннадцати крупных ТЭЦ в пяти городах (Москва, Ленинград, Минск, Киев и Харьков) было введено в эксплуатацию 29 турбин Т-250/300-240 (различных модификаций). В системе МОСЭНЕРГО на ТЭЦ-21,22,23,25 и 26 было установлено 19 турбин этого типа. Турбина на сверхкритических начальных параметрах 23,5 МПа, 540 град.С) с промежуточным промперегревом пара (3,7 МПа, 540 град.С), номинальной мощностью 250 МВт в теплофикационном режиме и 300 МВт в конденсационном режиме и обеспечивает при номинальных условиях работы более 380 МВт тепловой мощности. К настоящему времени эти турбины отработали несколько десятков лет и требуют выполнять работы по продлению срока их службы или замены.

В 2012 г. в ПАО МОСЭНЕРГО начались проработки (первые НИОКР) по возможности замены турбин Т-250/300-240. В результате сформулированного технического задания АО “Уральский турбинный завод” разработал новую теплофикационную турбину Т-295/335- 23,5. Турбина имеет следующие основные характеристики: параметры свежего пара – 23,5 МПа и 565 град.С; температура пара после промперегрева – 565 град.С; номинальная мощность – 295 МВт; максимальная – 335 МВт; номинальный расход пара – 1030 т/ч; номинальная тепловая нагрузка – 372 Гкал/ч; расчетный ресурс – до 250 тыс.ч.

Было принято решение об установке первого экземпляра турбины Т- 295/335-23,5 на ТЭЦ-22 ПАО МОСЭНЕРГО. Наряду с установкой новой турбины была проведена реконструкция прямоточного двухкорпусного пылегазового котла ПП-950/255Ж (модель ТПП-210А) со вспомогательным оборудованием производства ОАО ТКЗ “Красный котельщик”, после реконструкции – двухкорпусной котлоагрегат ПП- 1030-25,0-570/570 ГМ (модель ТПП-210 А/М). Тепловая схема турбоустановки – бездеаэрационная со смешивающим ПНД-2, с двумя питательными насосами с электроприводами. Применен нейтрально- кислородный водный режим (НКВР).

Проект реконструкции энергоблока выполнял ООО “Мосэнергопроект”. Реконструкция энергоблока реализована в существующем главном корпусе третьей очереди ТЭЦ-22 в ячейке старого основного оборудования с сохранением существующей ремонтной зоны и производственно-технических помещений.

Основное оборудование энергоблока установлено в осях “44” – “49”, ширина котельного отделения -39 м, ширина машинного зала – 59 м, шаг колонн – 12 м. Часть вспомогательного оборудования котла располагается на открытой площадке, прилегающей к главному корпусу за рядом “Г”. Расположение турбоагрегата – поперечное, оперативная отметка обслуживания +9,6 м. Обслуживание турбоагрегата осуществляется двумя существующими мостовыми кранами машинного зала грузоподъемностью 125/20 т каждый, а обслуживание оборудования котельного отделения выполняется существующим мостовым краном грузоподъемностью 50/10 т.

Новый энергоблок был запущен в эксплуатацию 27 июня 2022 г.

Основные результаты реализованного проекта:

1. Все основное оборудование прошедшего реконструкцию энергоблока изготовлено в России;
2. Тепловая мощность нового энергоблока на 13% больше, чем у Т- 250/300-240;
3. Электрическая мощность выше на 18% в теплофикационном режиме и на 11,7% в конденсационном режиме;
4. КПД отдельных ступеней новой турбины достигает 92%, а КПД всего энергоблока – 40% в конденсационном режиме;
5. Впервые в РФ использовано предустановленное оборудование для подключения к интеллектуальной системе аналитики и удаленного мониторинга ПРАНА (от РОТЕК);
6. На блоке установлена высокотехнологичная отечественная АСУ ТП.

УДК 621.311.22

В.Д. БУРОВ, к.т.н., профессор,
Я.Ю. СИГИДОВ, к.т.н., зам.ген.дир. АО «Интертехэлектро»,
ГО ЦЗИНЬФА, магистр

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14
E-mail: burovvd@mail.ru

**Возможные решения замены ГТУ на ГПУ
при проектировании ТЭЦ**

Аннотация. В работе представлены две альтернативы замены ГТУ фирмы Siemens на ТЭЦ и проведено сравнение характеристик проекта ТЭЦ и эксплуатационных затрат в предложенных вариантах.

Ключевые слова: ТЭЦ, ГТУ, ГПУ, характеристики проекта, затраты

V.D. BUROV, PhD, Professor,
YA.YU. SIGIDOV, PhD, Deputy General Director JSC "Intertelectro",
GUO JINFA, master

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya street, 14
E-mail: burovvd@mail.ru

Possible solutions for replacing GTU with GPU when designing CHPP

Abstract. This article presents two alternatives for replacing gas turbines Siemens in CHPP and compares the characteristics of the CHPP project and operating costs of the two alternatives.

Key words: CHPP, GTU, GPU, project characteristics, costs

Из-за международных санкций такие компании, как Siemens, General Electric, Mitsubishi и другие, запретили экспорт газовых турбин в Россию, что оказывает большое влияние на российскую энергетику. Поэтому необходимо рассмотреть разумные альтернативы.

Критериями выбора силовых агрегатов для строительства когенерационных электростанций являются вопросы надежности, эффективности, уровня эксплуатационных затрат, а также срока окупаемости оборудования электростанции и т.д. Важными факторами выбора силовых агрегатов являются простота эксплуатации, уровень технического обслуживания и ремонта, а также место выполнения ремонта силовых агрегатов [1].

Первоначально в проекте ГТУ-ТЭЦ рассматривалось строительство станции мощностью 120 МВт на базе двух ГТУ SGT-800 (Siemens) с водогрейными котлами-утилизаторами, но после санкционных ограничений в отношении оборудования импортируемого в Россию, ГТУ стали для проекта недоступны. При этом, по проекту был уже сделан задел (по строительной части). С целью реализации проекта были рассмотрены два варианта альтернативного основного технологического оборудования:

Вариант 1. Применение ГТУ МГТ-40 производства Марна (Иран) в количестве 3 шт. с 2 водогрейными котлами-утилизаторами и 1 резервным водогрейным котлом;

Вариант 2. Применение ГТУ 4000GF70-T производства JCPC CNPC (КНР) с блоками утилизации в количестве 24 шт. и 2 резервными водогрейными котлами.

Оба варианта предусматривают использование результатов ранее выполненных строительного-монтажных работ и изготовленного вспомогательного оборудования.

Характеристики ГТУ SGT-800 (Siemens) и основного оборудования двух альтернативных вариантов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики основного оборудования ТЭЦ

	SGT-800 (Siemens)	МГТ-40 (Иран)	4000GF70 -Т(КНР)
Выходная мощность, МВт	45	42,2	3,8
КПД, %	37	32,2	≥40
Температура выхлопных газов, °С	538	548	450
Массовый расход выхлопа, кг/с	130	147	5,92
Выбросы NOx	15 ppm	42 ppm при 15% O ₂ (с впрыском)	500 мг/м ³ при 5% O ₂
Номинальная частота, Гц	50	50	50
Номинальная скорость вращения, об./мин.	6608	5160	1000

Площади главного корпуса ГТУ-ТЭЦ SGT-800 (Siemens) и двух альтернативных вариантов приведены ниже:

ГК с ГТУ SGT-800 (Siemens) – размер в плане 71м x 114м;

ГК с ГТУ МГТ40 (Иран)– размер в плане 100м x 114м (вариант 1);

ГК с ГПУ 4000GF70-Т (КНР)–размер в плане 71м x 114м (вариант 2).

По расчету площадь главного корпуса с ГТУ МГТ40 нужно увеличить на 27%, что приводит к существенному увеличению стоимости строительства, площадь ГК в варианте 2 не изменяется.

Эксплуатационные затраты (без топлива), которые представлены в табл. 2. в вариантах сопоставимы, при этом КПД (в конденсационных режимах) ГПУ выше КПД ГТУ, легче обеспечить набор квалифицированного эксплуатационного персонала ТЭЦ на базе ГПУ.

Таблица 2. Сопоставление эксплуатационных затрат проекта ТЭЦ

	3хГТУ MGT-40 (вариант 1)	24хГПУ 4000GF-Т (вариант 2)
Затраты на сервис + расходные материалы (без топлива) [в долях]	1,0	1,61
Эксплуатационный персонал [чел.]	190	170
Затраты на эксплуатационный персонал, [в долях]	1,22	1
Затраты на эксплуатацию в год (без топлива), [в долях]	1,03	1

Сравнение некоторых характеристик вариантов проекта дано в табл. 3.

Вариант с ГПУ по сравнению с ГТУ имеет существенно более короткие сроки реализации и позволяет обеспечить энергоснабжение потребителей потребителя в период пуска-наладочных работ.

Вариант 2 позволяет подключить больше полезной нагрузки потребителя по сравнению с вариантом 1, при сохранении необходимого уровня резервирования. При этом в силу количества агрегатов работа в

изолированном режиме гораздо устойчивее к сбросам/набросам нагрузки, непланным остановкам генерирующих агрегатов [2].

Таблица 3. Сопоставление основных характеристик проекта ТЭЦ

	3хГТУ MGT-40 (вариант 1)	24хГПУ 4000GF70-T (вариант 2)
Установленная мощность ТЭЦ [МВт]	118,5	91,2
Присоединенная мощность потребителей с учётом резервирования (max), [МВт]	71,9	78,3
КПД по выработке электроэнергии (конденсационный режим), %	31,8%	42,4%
Удельный расход условного топлива (конденсационный режим), [г/кВтч]	387	290
Общая стоимость ТЭЦ [в долях]	1,21	1,0
Стоимость за 1МВт присоединенной нагрузки [в долях]	1,32	1,0
Срок поставки основного оборудования на площадку [мес.]	24 - 27	16 - 19

Вывод: для данного проекта более выгоден вариант ТЭЦ на базе ГПУ, который можно использовать при разработке аналогичных проектов в будущем.

Литература

1. Мутугуллина И.А. Сравнительный анализ газопоршневой и газотурбинной установок в контексте решения проблем энергосбережения, Вестник Казанского технологического университета, №12, 2014г. с. 373-375.

2. Шаулов В.Ю. Об опыте внедрения и эксплуатации газопоршневых миниТЭЦ. Материалы конференции «Малые и средние ТЭЦ. Современные решения». 7-9 сентября 2005 г., НП "Российское теплоснабжение", 2005г. с 12-23.

УДК 621.311.22

С.Д. ГОРШЕНИН, к.т.н.,
Е.Д. ГИЛЬМУТДИНОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, Рабфаковская улица 34
E-mail: gsd1985@yandex.ru, mr.egor225@mail.ru

Разработка экспериментального стенда деаэрационной установки с деаэратором типа АВАКС

Аннотация. В статье приведено описание концепции экспериментальной установки с деаэратором типа АВАКС для изучения влияния режимных и конструктивных параметров на эффективность деаэрации.

Ключевые слова: деаэрация, прямоточное устройство, экспериментальная установка, эффект деаэрации, начальный эффект.

S.D. GORSHENIN, Candidate of Engineering Sciences,
E.D. GILMUTDINOV, graduate student

Ivanovo State Power University,
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya street 34
E-mail: gsd1985@yandex.ru, mr.egor225@mail.ru

Development of an experimental stand for deaeration installation with an AVAX type deaerator

Annotation. The article describes the concept of an experimental installation with an AWACS type deaerator to study the influence of operating and design parameters on the efficiency of deaeration.

Key words: deaeration, direct-flow device, experimental installation, deaeration effect, initial effect.

Термические деаэраторы типа АВАКС являются прямоточными вакуумно-атмосферными кавитационно струйными деаэрационными устройствами, работающими за счет начального эффекта. Это компактные, недорогие и простые в эксплуатации устройства, не требующие подачи греющего пара, но ввиду малого располагаемого времени процесса обладают сравнительно малой эффективностью по удалению из воды коррозионно-активных газов. Эффект деаэрации, представляющий собой отношение разности массовых концентраций газа в деаэрируемой воде до и после аппарата к массовой концентрации газа в исходной воде не превышает 90% (по растворенному кислороду). Для сравнения, для атмосферного струйно-барботажного деаэратора серии ДА-м эффект деаэрации составляет 99,5% и более [1]. Указанные выше особенности отражаются на особенностях использования деаэраторов типа АВАКС в технологических схемах энергетических установок [2].

Несмотря на простоту конструктивного исполнения, деаэратор типа АВАКС является до сих пор малоизученным аппаратом. Отсутствие адекватных аналитических зависимостей эффективности деаэрации от режимных и конструктивных факторов, а также исследований, направленных на выявление границ применимости деаэрационных аппаратов данного типа, приводит к многочисленным ошибкам, допускаемым проектировании и негативному опыту промышленного их внедрения в технологические схемы энергетических предприятий.

Значимый вклад в исследование эффективности деаэраторов типа АВАКС сделан научным коллективом кафедры ТЭС ИГЭУ, в частности Ледуховским Г.В., Барочкиным Ю.Е. [3]. Однако следует констатировать, что задача режимной и конструктивной оптимизации остается нерешенной.

Численное моделирование сопряжено с рядом трудностей, связанных с поиском адекватных моделей турбулентности и их параметров, наличием узкоспециализированных моделей тепломассообменных

процессов для моделирования процессов абсорбции и десорбции компонентов газовой смеси водой, затратами времени на решение и обработку результатов одного варианта и т.п. В связи с этим в качестве основного метода для решения задачи режимной и конструктивной оптимизации деаэратора типа АВАКС был выбран метод физического эксперимента.

Схема экспериментального стенда деаэратора типа АВАКС приведена на рис. 1.

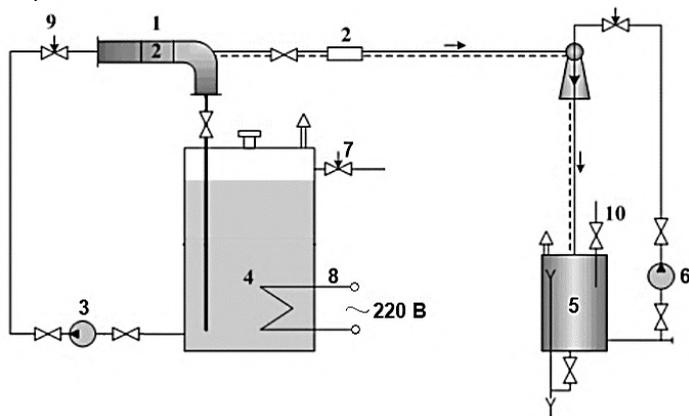


Рис. 1. Схема экспериментального стенда деаэратора типа АВАКС:

- 1 – деаэрационное устройство «АВАКС»; 2 – смотровая вставка;
3 – циркуляционный насос; 4 – бак деаэрированной воды; 5 – бак эжектора;
6 – насос эжектирующей воды; 7 – регулятор давления пара в паровой подушке;
8 – ТЭН; 9 – регулирующий клапан; 10 – подвод водопроводной воды

Экспериментальная установка включает в себя деаэрационный контур и контур эжектора. Деаэрационный контур включает помимо самого деаэратора 1 циркуляционный насос 3, бак деаэрированной воды 4, оборудованный ТЭНом 8 и линией подачи пара для создания паровой подушки. Для организации отсоса выпара предусмотрен водоструйный эжектор, контур которого включает в себя бак-газоотделитель 5 и насос эжектирующей воды 6.

Модель проточной части собственно деаэратора изображена на рис. 2. Она состоит из цилиндрической прозрачной трубы из поликарбоната 1, входного обтекателя с направляющими лопатками 2 и выходного обтекателя 3, линии отсоса выпара 5 и импульсной линии 4 для контроля разрежения в паровом пространстве деаэратора.

Установку предполагается оборудовать средствами измерения расхода, температуры, давления воды и концентрации растворенного кислорода до и после деаэратора, разрежения и температуры в линии отсоса выпара, разрежения в паровом пространстве деаэратора.

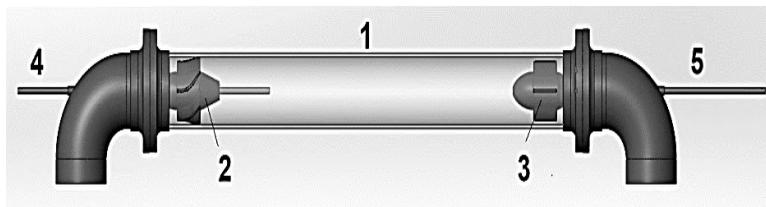


Рис. 2. Геометрическая модель деаэратора типа АВАКС:
1 – прозрачная труба; 2 – входной обтекатель с направляющим аппаратом;
3 – выходной обтекатель со спрямляющим аппаратом; 4 – импульсная линия измерения давления в паровом пространстве деаэратора;
5 – линия отсоса пара

Производство геометрически сложных деталей установки предполагается осуществить с использованием *fdm* технологии 3D печати.

Литература

1. Шатова И.А., Барочкин Е.В., Ледуховский Г.В. Выбор схемы включения прямоточных деаэрационных устройств // Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования: материалы IV Рос. науч.-практич. конф. – Иваново, 2005. – С. 63–65.
2. Ледуховский Г.В. Реконструкция атмосферных струйных деаэраторов с применением кавитационных деаэрационных устройств «АВАКС» / Г.В. Ледуховский, В.Н. Виноградов, И.А. Шатова, А.А. Разенков // Вестник ИГЭУ, 2014, вып. 6. с. 5-10.
3. Барочкин Ю.Е. Совершенствование технологических систем ТЭС с применением кавитационно-струйного деаэратора: дис. ... к.т.н: 05.14.14. – Иваново, 2008. – 165 с.

УДК 621.311.22

А.Е. БАРОЧКИН к.т.н., доцент,
П.А. КУТРАКОВ, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: kutakovp@gmail.com

Реконструкция турбины К-300-240 Костромской ГРЭС

Аннотация. В работе рассмотрен вариант реконструкции турбин К-300-240 Костромской ГРЭС. Замена корпусов ЦВД, ЦСД, ротор ЦВД с реактивным облопачиванием, замена блока регулирования, реконструкция системы регулирования, изменение системы парораспределения с заменой на регулирующие клапана.

Ключевые слова: паровая турбина, реконструкция, цилиндр высокого давления, реактивное облопачивание.

A.E. BAROCHKIN Candidate of Engineering, associate professor,
P.A.KUTRAKOV, student

Ivanovo State Power University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: kuttrakovp@gmail.com

Reconstruction of the K-300-240 turbine of the Kostromay GRES

Abstract. The work considers the option of reconstruction of turbines k-300-240 of the Kostroma State District Power Plant. Replacement of HPC, LPC, HPC rotor with reactive blasting, replacement of control unit, reconstruction of control system, change of steam distribution system with replacement with control valves.

Key words: steam turbine, reconstruction, high pressure cylinder, reactive blasting

Сегодня Костромская ГРЭС – одна из наиболее крупных и экономичных тепловых электростанций России, по праву являющаяся флагманом отечественной энергетики.

Цель модернизации возобновление ресурса основных высокотемпературных узлов турбин, обновление оборудования с одновременным повышением технико-экономических показателей и продление срока эксплуатации, повышение надёжности и эксплуатационных характеристик отпуса тепловой и электрической энергии.

На турбине К-300-240 Костромской ГРЭС, ст. №4, 7, 8 произведена модернизация проточных частей ЦВД и ЦСД направленная на увеличение номинальной мощности до 327,5 МВт при расходе свежего пара 990 т/ч.

После модернизации турбина маркируется как К-330-23,5-8МР.

Паровая турбина К-330-23,5-8МР предназначена для непосредственного привода электрического генератора переменного тока с частотой вращения 50 с^{-1} (3000 об/мин).

В соответствии с техническими условиями № 10540001 ТУ 01 модернизации произведены следующие конструктивные решения с установкой комплекта узлов и деталей:

- ЦВД заменен на новый, комплектно установлены новые: ротор ВД с реактивным облоачиванием, детали проточной части и концевых уплотнений цилиндра;
- ЦСД заменен на новый, комплектно установлены новые: ротор СД, детали проточной части и концевых уплотнений цилиндра;
- реконструкция системы регулирования турбины в электрогидравлическую и оснащение ПТК ЭЧСР;
- замена блока регулирования на новый, включающий в себя: золотники регулятора безопасности, механизм управления, два электромагнитных выключателя и золотники для их испытания;
- на регуляторе безопасности установлено зубчатое колесо для взаимодействия с датчиками частоты вращения;

- изменена система парораспределения ЦВД с переходом на четыре регулирующих клапана, полностью установлены новые блоки клапанов ЦВД с сервомоторами;

- комплектная замена блоков клапанов ЦСД с сервомоторами и установка ЭМП для управления сервомоторами РК и СБК;

- блок маслоснабжения системы регулирования сохранен. В связи с демонтажем узлов и введением новых узлов произведена реконструкция маслопровода системы регулирования, для сохранения быстродействия системы регулирования по гидравлическим линиям сохраняется существующая колонка регулирования;

- предусмотрена комплектная замена аппаратуры контроля параметров теплового и механического состояния турбины;

Паровая турбина К-330-23,5-8МР - конденсационная, с промежуточным перегревом пара и тремя выхлопами

Номинальная мощность турбины 330 МВт обеспечивается при полностью включенной системе регенерации, без дополнительных отборов пара. Параметры турбины приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры при номинальной мощности

Параметр	Значение
Частота вращения, с ⁻¹ (об/мин)	50 (3000)
Давление острого пара, МПа (кгс/см ²)	23,54 (240)
Температура острого пара, °С	540
Давление пара после ЦВД, МПа (кгс/см ²)	4,05 (41,31)
Температура пара после ЦВД, °С	286,8
Давление пара перед ЦСД, МПа (кгс/см ²)	3,67 (37,47)
Температура пара перед ЦСД, °С	540
Давление в конденсаторе, кПа (кгс/см ²) абс.	2,8 (0,029)
Температура охлаждающей воды в конденсаторе, °С	12
Расход охлаждающей воды в конденсатор, т/ч	36000
Расход пара на турбину, кг/с (т/ч)	275 (990,0)

Расчетная тепловая схема с реконструированной турбиной при выдаваемой мощности 327 МВт представлена на рис. 1.

Для реконструированной турбины были определены новые энергетические характеристики. В качестве примера на рис. 2 приведена зависимость поправочного коэффициента к мощности от давления свежего пара.

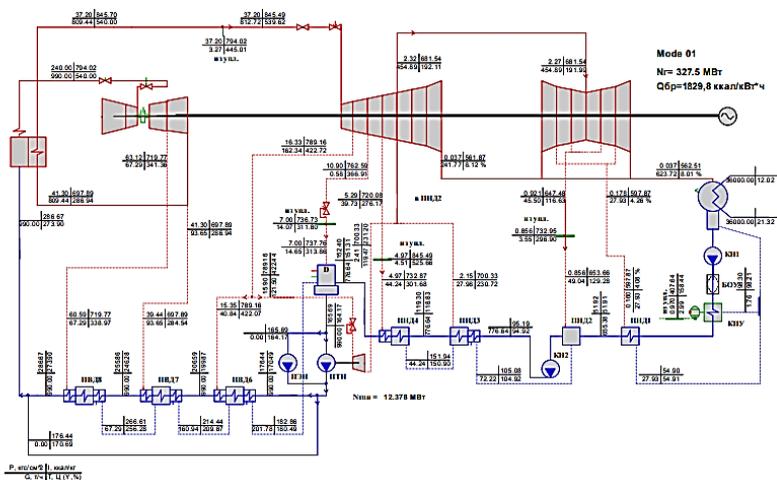


Рис. 1. Тепловая схема при N=327 МВт

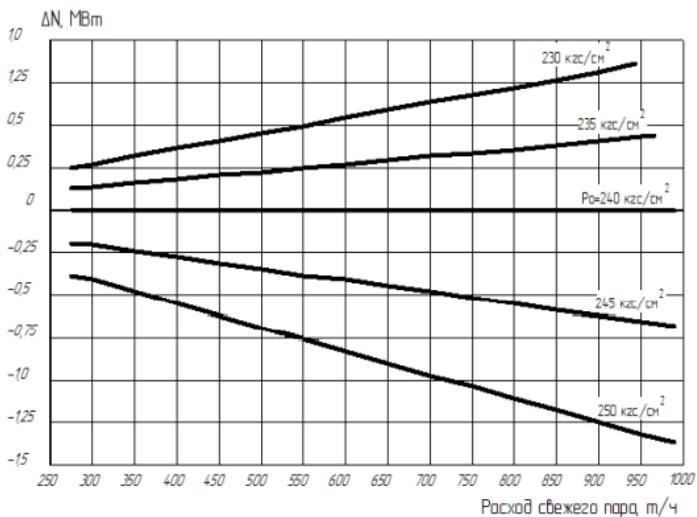


Рис. 2. Поправка к мощности в зависимости от давления свежего пара

УДК 621.311.22

А.С. ЗИНОВЬЕВА, аспирант,
Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, д.т.н., профессор
В.П. ЖУКОВ, д.т.н., профессор
А.А. БОРИСОВ, к.т.н.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Разработка методики анализа достоверности данных системы технического учета показателей работы ГТУ в рамках концепции регуляризации Тихонова при решении некорректных задач

Аннотация. На основе концепции регуляризации Тихонова при решении некорректных задач сформулирована задача сведения материального и энергетического балансов ГТУ по данным, получаемым от системы технического учета показателей работы оборудования, с учетом метрологических характеристик используемых средств измерения параметров.

Ключевые слова: газотурбинная установка, материальный баланс, энергетический баланс, некорректная задача, регуляризация Тихонова.

A.S. ZINOVIEVA, graduate student,
G.V. LEDUHOVSKY, Doctor of Engineering,
V.P. ZHUKOV, Doctor of Engineering,
A.A. BORISOV, Candidate of Engineering

Ivanovo State Power University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Development of a Method for Analyzing the Reliability of the Data of the System for Technical Accounting of the Performance of Gas Turbine Plant in the framework of Tikhonov's regularization concept when solving ill-posed problems

Abstract. On the basis of Tikhonov's concept of regularization, when solving incorrect problems, the problem of reducing the material and energy balances of gas turbine plants according to the data received from the system of technical accounting of equipment operation indicators was formulated. The method takes into account the metrological characteristics of the used means for measuring parameters.

Key words: gas turbine plant, material balance, energy balance, ill-posed problem, Tikhonov regularization.

Сведение материального и энергетического балансов по данным, получаемым от систем коммерческого и / или технического учета пара-

метров работы оборудования, является необходимым этапом расчета фактических и номинальных показателей энергетических установок [1]. Применительно к газотурбинным установкам (ГТУ) нормативными документами порядок выполнения расчетов по сведениям балансов не регламентирован, соответствующие методические рекомендации отсутствуют. Ранее аналогичная задача применительно к паротурбинным установкам нами решена на основе концепции регуляризации Тихонова [2]. Целью настоящего исследования является распространение этого подхода на ГТУ электростанций.

Энергетический (1) и материальный (2) балансы ГТУ, составляемые по результатам измерения контролируемых в ходе эксплуатации параметров (в среднечасовом разрезе), в общем случае не сводятся:

$$Q_{\text{КС}}^{\text{И}} + Q_{1\text{К}}^{\text{И}} - Q_{2\text{Т}}^{\text{И}} - Q_5 - Q_{\text{ЭМ}} - N_{\text{ГТУ}}^{\text{И}} = \Delta E, \quad (1)$$

$$V_{\text{КС}}^{\text{И}} + G_{1\text{К}}^{\text{И}} - G_{2\text{Т}}^{\text{И}} = \Delta G; \quad (2)$$

где $Q_{\text{КС}}$ – тепловая мощность, подведенная к камере сгорания, МВт; $Q_{1\text{К}}$ – тепловая мощность, подведенная с воздухом к компрессору ГТУ, МВт; $Q_{2\text{Т}}$ – тепловая мощность продуктов сгорания на выходе из ГТУ, МВт; Q_5 – мощность тепловых потерь от наружного охлаждения элементов ГТУ, МВт; $Q_{\text{ЭМ}}$ – мощность электромеханических потерь ГТУ, МВт; $N_{\text{ГТУ}}$ – электрическая мощность ГТУ, МВт; $V_{\text{КС}}$, $G_{1\text{К}}$ и $G_{2\text{Т}}$ – расходы соответственно топлива в камеру сгорания, воздуха на входе в компрессор, продуктов сгорания на выходе из турбины, кг/с; индекс «и» указывает на измеренное значение параметра, получаемое от систем учета как результат прямого или косвенного измерения; ΔE , МВт, и ΔG , кг/с – невязки соответственно энергетического и материального балансов.

Мощности Q_5 и $Q_{\text{ЭМ}}$ вычисляются по результатам экспертной оценки [1]. Прочие слагаемые Q_i ; уравнения (1) связаны со слагаемыми уравнения (2):

$$Q_{\text{КС}}^{\text{И}} = V_{\text{КС}}^{\text{И}}(h_{\text{топл}}^{\text{И}} + Q_{\text{Н}}^{\text{П}}); Q_{1\text{К}}^{\text{И}} = G_{1\text{К}}^{\text{И}}h_{1\text{К}}^{\text{И}}; Q_{2\text{Т}}^{\text{И}} = G_{2\text{Т}}^{\text{И}}h_{2\text{Т}}^{\text{И}}, \quad (3)$$

где $h_{\text{топл}}^{\text{И}}$, $h_{1\text{К}}^{\text{И}}$, $h_{2\text{Т}}^{\text{И}}$ – энтальпия соответственно топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ, воздуха на входе в компрессор, продуктов сгорания за турбиной, МДж/кг; $Q_{\text{Н}}^{\text{П}}$ – низшая удельная теплота сгорания на рабочую массу топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ, МДж/кг.

В рамках концепции регуляризации Тихонова [2, 3] исходная некорректная задача сводится к задаче минимизации функции

$$F(\mathbf{Y}, \lambda) = |\mathbf{A}\mathbf{Y}|^2 + \lambda|\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0|^2 \Rightarrow \min, \quad (4)$$

где \mathbf{Y} , \mathbf{Y}_0 – искомое регуляризованное решение и его априорная оценка; \mathbf{A} – известный матричный оператор модели системы; λ – малый положительный параметр регуляризации, который необходимо подобрать в ходе решения задачи.

Первое слагаемое в (4) характеризует суммарную невязку балансов, а второе – модуль вектора отклонения полученного решения от исходного вектора.

Применительно к рассматриваемой задаче (1), (2) для ГТУ матричный оператор \mathbf{A} и искомое регуляризованное решение \mathbf{Y} с учетом (3) могут быть представлены в виде

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ h_{\text{топл}}^i + Q_{\text{н}}^p & h_{1\text{к}}^i & -h_{2\text{т}}^i & -\frac{1}{\eta_{5\text{т}}} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{Y} = (B_{\text{КС}} \ G_{1\text{к}} \ G_{2\text{т}} \ N_{\text{ГТУ}})^T, \quad (6)$$

где $\eta_{5\text{т}}$ характеризует суммарные потери ГТУ (тепловые потери от наружного охлаждения элементов и электромеханические потери) и определяется согласно равенству: $Q_5 + Q_{\text{эм}} + N_{\text{ГТУ}} = \frac{N_{\text{ГТУ}}}{\eta_{5\text{т}}}$; индекс «Т»

указывает на транспонирование матрицы.

Предложенная методика апробирована при сведении балансов по ГТУ типа GTX-100. Результаты решения задачи, соответствующие λ^* , для одного из режимов работы ГТУ ($h_{\text{топл}} = 0,11509$ МДж/кг, $Q_{\text{н}}^p = 50,535$ МДж/кг, $h_{1\text{к}} = 0,002692$ МДж/кг, $h_{2\text{т}} = 0,60243$ МДж/кг, $\eta_{5\text{т}} = 0,9414$) приведены в таблице.

Таблица. Исходные данные и результаты расчетов для одного из режимов работы ГТУ типа GTX-100

Обозначение показателя, единица измерения	Значение	
	исходное	результат решения
1. $B_{\text{КС}}$, кг/с	1,79	1,81
2. $G_{1\text{к}}$, кг/с	101,46	100,19
3. $G_{2\text{т}}$, кг/с	99,54	100,79
4. $N_{\text{ГТУ}}$, МВт	29,23	29,20
5. ΔG , кг/с	3,7100	1,2047
6. ΔE , МВт	-0,0786	-0,0241
7. $F(\lambda)$	13,7703	4,6201
8. λ^*	-	0,95

На примере рассматриваемой ГТУ определены предельные отклонения фактических значений КПД брутто при корректировке результатов измерения контролируемых параметров в ходе сведения балансов. Выявлено, что ошибка в значении КПД брутто, получаемая при отсутствии сведения балансов, составляет в среднем 4,8% с отклонениями до 15% в отдельных режимах. Это подтверждает целесообразность совершенствования и использования в практических расчетах методики совместного сведения материального и энергетического балансов ГТУ на предварительном этапе обработки результатов измерения контролируемых параметров.

Литература

1. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – 468 с.

2. Алгоритмы сведения материальных и энергетических балансов при расчетах технико-экономических показателей оборудования ТЭС на основе метода регуляризации некорректных задач / Ледуховский Г.В., Жуков В.П., Барочкин Е.В. [и др.] // Теплоэнергетика. – 2015. – №8. – С.72–80.

3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979.

УДК 621.311.22

И.А. КОКУЛИН, ассистент,
Д.А. СОЛИЛОВ, студент,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: daniilsolilof@gmail.com

Улучшение технико-экономических показателей работы Ново-Иркутской ТЭЦ

Аннотация. Одной из главных проблем всех современных ТЭЦ является снижение отпуска тепловой энергии ввиду снижения теплопотребления в жилых домах и сокращение потребления тепла с паром и горячей водой промышленными потребителями. Данные обстоятельства обуславливают увеличение конденсационной выработки электроэнергии на ТЭЦ, что негативно сказывается на эффективности производства тепла и электроэнергии. В статье рассмотрены мероприятия по увеличению тепловых нагрузок на действующей Ново-Иркутской ТЭЦ путем переключения потребителей закрываемых котельных. Выполнена оценка изменения технико-экономических показателей работы в случае реализации проекта.

Ключевые слова: тепловая нагрузка, комбинированная выработка тепла и электроэнергии, удельный расход топлива.

I.A. KOKKULIN, Assistant
D.A.SOLILOV, student

Ivanovo State Power University,
34, Rabfakovskaya st., 153003, Ivanovo
E-mail: daniilsolilof@gmail.com

Improving the technical and economic performance of the Novo-Irkutsk thermal power plant

Annotation. One of the main problems of all modern thermal power plants is to reduce the supply of thermal energy due to a decrease in heat consumption in residential buildings and a reduction in the consumption of heat with steam and hot water by industrial consumers. These circumstances cause an increase in the condensation generation of electricity at the CHP, which negatively affects the efficiency of heat and electricity production. The article discusses measures to increase thermal loads at the operating Novo-Irkutsk CHP by switching consumers of closed boiler houses. The assessment of changes in technical and economic indicators of work in the case of the project implementation was carried out.

Key words: thermal load, combined heat and electricity generation, specific fuel consumption.

Ново-Иркутская ТЭЦ предназначена для выработки электрической энергии и тепловой энергии для покрытия электрических и тепловых нагрузок в паре и горячей воде промышленных предприятий и жилищно-коммунального сектора города Иркутска. Установленная электрическая мощность станции составляет 708 МВт, тепловая мощность – 1612,5 Гкал/ч. Коэффициент использования установленной электрической мощности составляет 45,56 %, тепловой – 35,28 %.

Помимо Ново-Иркутской ТЭЦ в городе действуют 36 угольных и мазутных котельных с суммарной тепловой мощностью 1045 Гкал/ч. На большинстве котельных установлено морально и физически изношенное оборудование.

Для улучшения режимов работы теплофикационного оборудования ТЭЦ авторами проанализированы варианты увеличения подключенной тепловой нагрузки потребителей в горячей воде к коллекторам станции. Для увеличения тепловой нагрузки Ново-Иркутской ТЭЦ планируется провести следующие мероприятия:

1. Закрытие котельных по ул. Ядринцева-Баррикад. В 2025 году планируется переключение тепловых нагрузок потребителей котельных по: ул. 4-я Советская, 1а, 4-я Советская, 1, ул. Радищева, 67, ул. Вьюжная, 2, ул. Нестерова, 32, «Сварщик», ул. Освобождения, 58 на Ново-Иркутскую ТЭЦ со строительством тепловых сетей и ЦТП взамен котельных по: ул. Черского, 1; ул. Баррикад, 145; ул. Ленская, 6; ул. Баррикад, 159; ул. Зимняя, 6; ул. Напольная, 90.

2. Закрытие котельных по ул. Радищева. В 2025 году планируется строительство тепловых сетей и ЦТП взамен котельных по: ул. Нестерова, 14; ул. Радищева, 67; ул. Нестерова, 32; ул. Радищева, 132; ул. Вьюжная, 2 с переключением тепловой нагрузки потребителей на Ново-Иркутскую ТЭЦ.

3. Переключение котельной мкр. Зеленый. В 2024 году планируется переключение тепловых нагрузок потребителей с котельной мкр. Зеленый на Ново-Иркутскую ТЭЦ со строительством тепловых сетей и ЦТП взамен котельной мкр. Зеленый.

В общей сложности планируется выполнить переключение потребителей 15 котельных с общей договорной тепловой нагрузкой 70,7 Гкал/ч. Подключение потребителей других котельных к сетям Ново-Иркутскую ТЭЦ выполнять нецелесообразно ввиду большого удаления от существующей системы теплоснабжения станции. Дополнительным положительным следствием от закрытия котельных является улучшение экологической ситуации за счет прекращения сжигания угля в центральном районе города.

Для моделирование мероприятий на тепловых сетях, необходимых для подключения тепловых нагрузок закрываемых котельных использовалась электронная модель тепловых сетей в программном комплексе ZuluThermo. На основании анализа гидравлических режимов работы тепловых сетей был определен перечень мероприятий, который вклю-

чает в себя строительство 16,4 км новых тепловых сетей, установку 12 центральных тепловых пунктов взамен котельных, ввод дополнительной насосной станции. Общая стоимость реализации проекта составляет порядка 4 млрд. рублей.

Перспективные топливно-энергетические показатели Ново-Иркутской ТЭЦ рассчитаны с учетом действующих энергетических характеристик турбоагрегатов станции и анализа наиболее оптимальных режимов работы теплофикационного оборудования ТЭЦ в период до 2030 года. Результаты выполненных расчетов приведены в табл. 1. Прогнозная динамика показателей деятельности Ново-Иркутской ТЭЦ пересмотрена с учетом планов по подключению новых потребителей и проектов переключения котельных.

Реализация предложенных мероприятий приведет к увеличению отпуска тепловой энергии с коллекторов Ново-Иркутской ТЭЦ на 580,2 тыс. Гкал (на 11 % относительно уровня 2022 года), а также к увеличению выработки электроэнергии на 432,9 тыс. МВт-ч (на 17 % относительно уровня 2022 года). В результате прогнозируется снижение удельного расхода условного топлива на отпуск тепла и электрической энергии.

Таблица 1. Топливо-энергетические балансы Ново-Иркутской ТЭЦ

Показатель	Един. изм.	Величина показателя		
		2022	2025	2030
Отпуск тепловой энергии с коллекторов, в том числе	тыс. Гкал	5 019,0	5 323,4	5 599,2
хозяйственные нужды	тыс. Гкал	21,3	21,3	21,3
Выработка электрической энергии всего, в том числе	тыс. МВт-ч	2 531,10	2 738,20	2 964,00
на тепловом потреблении	тыс. МВт-ч	2 043,10	2 250,20	2 476,00
в конденсационном режиме	тыс. МВт-ч	488	488	488
Отпуск электрической энергии	тыс. МВт-ч	2 142,30	2 332,80	2 540,60
Затрачено условного топлива всего, в том числе	тыс. т условного топлива	1 251,7	1 338,1	1 425,3
на выработку электрической энергии	тыс. т условного топлива	604,2	652,0	704,7
на выработку тепловой энергии	тыс. т условного топлива	647,5	686,2	720,6
УРУТ на выработку электрической энергии	г/кВт-ч	238,7	238,1	237,7
УРУТ на выработку тепловой энергии	кг/Гкал	128,3	128,2	128,1
УРУТ на отпуск электрической энергии	г/кВт-ч	282,0	279,5	277,4
УРУТ на отпуск тепловой энергии	кг/Гкал	129,0	128,9	128,7

УДК 621.311.22

С.А. ПАНКОВ, к.т.н., доцент,
Е.И. РЯБОВА, ст. преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Проект реконструкции цилиндра высокого давления паровой турбины большой мощности

Аннотация. Рассматривается реконструкция цилиндра высокого давления паровой турбины большой мощности на сверхкритические параметры пара с переводом её на дроссельное парораспределение и реактивное облопачивание. Проведены сравнительные расчеты проточной части цилиндра на номинальный режим и частичную нагрузку до и после реконструкции.

Ключевые слова: цилиндр высокого давления, турбинная ступень, ротор, парораспределение, регулирующие клапаны, коэффициент потерь энергии.

S.A. PANKOV Candidate of Engineering, associate professor
E.I. RYABOVA, ing.

Ivanovo State Power Engineering University,
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Reconstruction project of a high-pressure cylinder of a high-power steam turbine

Abstract. The reconstruction of a high-pressure cylinder of a high-power steam turbine for supercritical steam parameters with its transfer to throttle steam distribution and reactive flapping is considered. Comparative calculations of the flow part of the cylinder for the nominal mode and partial load before and after reconstruction are carried out.

Key words: high-pressure cylinder, turbine stage, rotor, steam distribution, control valves, energy loss coefficient.

Большое количество паровых турбин, установленных на ГРЭС к настоящему времени выработало свой паркочный ресурс и имеют технико-экономические показатели значительно ниже заводских. Например, одна из наиболее распространенных энергоустановок мощность 300 МВт с турбиной К-300-23,5 ЛМЗ имеет среднее значение КПД 35,8% [1]. Согласно оценке Минэнерго, в России в ближайшее время необходимо обновить или вывести из эксплуатации более половины генерирующих мощностей. В начале 2019 года Правительство РФ одобрило новую программу по отбору проектов для модернизации (КОММод) или ДПМ-2. Главной задачей этой программы является модернизация старого генерирующего оборудования с целью повышения эффективности

его работы, продления срока службы, снижения затрат на техническое обслуживание и повышения эксплуатационной гибкости.

Одним из наиболее эффективных инновационных предложений реконструкции мощных паровых турбин ТЭС является замена ротора ЦВД активного типа на реактивный. Впервые в странах СНГ такие работы были выполнены на трёх турбинах К-300-23,5 Лукомльской ГРЭС (Беларусь), а затем на четырех аналогичных турбинах Конаковской ГРЭС (в 2005...2015 гг.). А в рамках программы (КОММод) первый энергообъект реализации этой программы - энергоблок №8 Костромской ГРЭС (ввод декабрь 2021 г.) и энергоблок №4 (ввод 1 июля 2022 г.).

Проведенная реконструкция турбин К-300-23,5 позволила обеспечить повышение надежности работы оборудования, продление ресурса еще на 25+30 лет (220 тысяч часов), существенно улучшить показатели эффективности работы станции. Установленная мощность энергоблоков после реконструкции выросла на 10% и составила 330 МВт [2].

Повышение эффективности в большой степени получено за счет реконструкции цилиндра высокого давления (рис. 1). Выполнена замена нерегулируемых турбинных ступеней активного типа на реактивные.

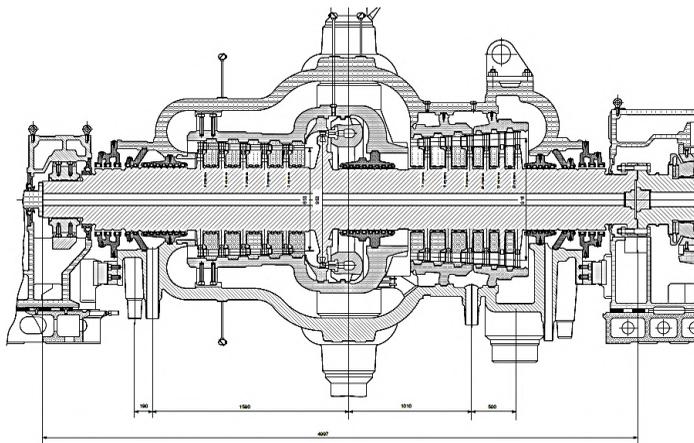


Рис. 1. Продольный разрез цилиндра высокого давления турбины К-300-23,5-1

Переход на реактивное облопачивание позволяет повысить КПД ЦВД на 5+6 %. Это подтверждают многочисленные расчеты, выполненные на кафедре ТЭС ИГЭУ для ЦВД турбины К-300-23,5, а также сравнительные испытания энергоблоков до и после реконструкции на Лукомской, Конаковской и Костромской ГРЭС.

При реконструкции выполняется замена внутреннего корпуса цилиндра и ротора высокого давления. При этом регулирующая ступень активного типа сохраняется (рис. 2). Ее наличие необходимо при сопловом

способе парораспределения, которое считается наиболее эффективным для турбин, работающих в переменном графике нагрузок.

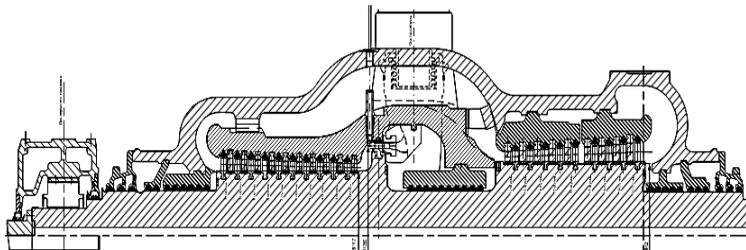


Рис. 2. Продольный разрез цилиндра высокого давления реактивного типа

На практике экономическое преимущество соплового парораспределения в сравнении с дроссельным не однозначно для разного типа турбин, а дополнительные конструктивные сложности очевидны [4]. Кроме конструктивных сложностей система парциального подвода пара серьезно снижает КПД регуливающей ступени и провоцирует возникновение нестационарных сил с максимальным 100% изменением усилия, вызывающих вибрацию рабочих лопаток регуливающей ступени. В связи с этим сейчас уже нет единой точки зрения о преимуществе использования соплового парораспределения на турбинах, работающих с переменными нагрузками. Некоторые зарубежные фирмы, такие как «Сименс» и АВВ давно применяют дроссельное парораспределение в большинстве своих турбин [5].

Сравнительные расчеты, выполненные для ЦВД К-300-23,5 на номинальный расход пара, показали, что при сопловом парораспределении и активном роторе (рис. 1) КПД регуливающей ступени составил 0,68, КПД первой нерегулируемой ступени - 0,835, КПД цилиндра высокого давления - 0,834, а внутренняя мощность - 98,5 МВт. При дроссельном парораспределении и реактивном роторе с 20-ю ступенями (рис. 3) КПД ЦВД составил 0,888, а внутренняя мощность - 103,88 МВт. Таким образом относительное приращение мощности составило 5,5 % и внутреннего КПД - 6,5 %.

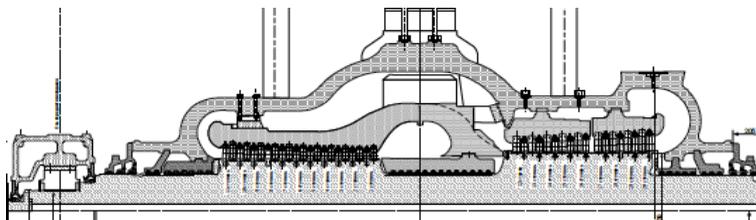


Рис. 3. Продольный разрез цилиндра высокого давления реактивного типа с дроссельным парораспределением

Сравнительные расчеты, выполненные для ЦВД К-500-23,5 ЛМЗ на номинальный расход пара с сопловым и дроссельным парораспределением без замены ротора показали, что внутренний КПД цилиндра вырос с 0,834 при сопловом парораспределении до 0,842 при дроссельном, а внутренняя мощность со 177 МВт до 178,7 МВт. Расчеты на частичный расход пара (80% номинального) показали незначительное относительное снижение внутреннего КПД ЦВД при дроссельным парораспределением в сравнении с сопловым.

В [4] представлены результаты сравнительных расчетов ЦВД К-800-240 ЛМЗ при сопловом и дроссельном парораспределении. На расчетном режиме при сопловом парораспределении КПД первой ступени (регулирующей, со степенью парциальности 0,8) составил 0,76, а КПД первой ступени (нерегулируемой) при дроссельным парораспределении – 0,86. Расчеты на переменный режим с расходом пара равным 0,4 номинального показали, что при сопловом парораспределении это соответствует режиму одного полностью открытого клапана с парциальностью 0,2. Внутренний относительный КПД регулирующей ступени уменьшился до значения 0,376. При дроссельном парораспределении в этом режиме коэффициент дросселирования составил 0,423 и внутренний относительный КПД первой ступени снизился до значения 0,366.

Проведенное сравнение показало, что и при «глубокой» разгрузке турбины экономичность первой ступени ЦВД как при сопловом, так и при дроссельном парораспределении оказывается приблизительно одинаковой. Таким образом заметного экономического преимущества соплового регулирования при нерасчетном режиме работы сравнительные расчеты не подтвердили. А недостатки очевидны: более сложная система паравпуска, большое число регулирующих клапанов (на К-300-23,5 их 7), наличие специальной турбинной ступени переменной парциальности и специальной камеры регулирующей ступени, высокие динамические напряжения в рабочих лопатках регулирующей ступени.

Отмеченные недостатки отсутствуют при дроссельном парораспределении. Изменяются требования к регулирующим клапанам, их количество может быть уменьшено до двух и можно использовать совмещенные стопорно-регулирующие клапаны современной конструкции с сопротивлением всего 2 % начального давления пара.

Литература

1. Трухний А.Д. Состояние и перспективные технологии мировой и российской теплоэнергетики. Энергетика – вчера, сегодня, завтра. 2018 г.
2. Мельников А.В., Неуймин В.М. Первые итоги технического перевооружения Конаковской ГРЭС. Надежность и безопасность энергетики. 2011, № 3.
3. Костюк А.Г., Трухний А.Д. Сравнение активных и реактивных цилиндров высокого давления паровых турбин. Теплоэнергетика. 2005 г. №6.

4. Зарянкин А.Е., Симонов Б.П. Регулирующие и стопорно-регулирующие клапаны паровых турбин. -М.: Издательство МЭИ, 2005.

5. Сравнительный анализ соплового и дроссельного парораспределения в энергетических паровых турбинах / Зарянкин А.Е., Носкова М.А., Роголёв А.Н. // Естественные и технические науки 2013г. Выпуск №5 стр. 220-227.

УДК 621.311.22

А.Е. БАРОЧКИН к.т.н., доцент,
П.Д. РОМАНИН, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: pavel010526@mail.ru

Последствия от перехода г. Омск в ценовую зону теплоснабжения

Аннотация. В работе рассмотрены последствия от перехода г. Омск в ценовую зону теплоснабжения.

Ключевые слова: ценовая зона, надежность теплоснабжения, тепловые сети.

A.E. BAROCHKIN Candidate of Engineering, associate professor,
P.D.ROMANIN, student

Ivanovo State Power University,
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: pavel010526@mail.ru

Consequences of the transition of Omsk to the price zone of heat supply

Abstract. The paper considers the consequences of the transition of Omsk to the price zone of heat supply.

Key words: price zone, reliability of heat supply, heating networks.

Ценовые зоны теплоснабжения - это те зоны (поселения, городские округа и другие населенные пункты), где применяется новая модель рынка тепла, называемая «альтернативной котельной». Модель призвана изменить существующие порядки ценообразования для конечных потребителей, сделать отрасль более предсказуемой и как следствие- решить проблемы, связанные с бесперспективностью долгосрочных инвестиций в рынок тепловой энергии.

Проблема высокой степени износа тепловых сетей анализируется на примере тепловых сетей в зоне действия ЕТО-1 АО «ОмскРТС», на долю которой приходится 79 % от материальной характеристики всех тепловых сетей в городе Омск. Около половины всех тепловых сетей, эксплуатируе-

мых АО «ОмскРТС» имеют срок службы более 30 лет (962 км в однострубно-м исчислении или 49,6 % по материальной характеристике).

В тарифно-балансовой модели ЕТО-1 были выполнены прогнозы возможных объемов финансирования мероприятия по реконструкции тепловых сетей с превышенным сроком эксплуатации. В итоге было определено, что при сохранении текущего тарифного регулирования, т.е. при ежегодной индексации тарифов на уровне не выше 4 % в год, возможный объем инвестиций в перекладку тепловых сетей составит 11,4 млрд. руб. в период с 2023 по 2040 год. С учетом действующих «Укрупненных нормативов цены строительства. НЦС 81-02-13-2022. Сборник № 13. Наружные тепловые сети» были определены возможные объемы реконструкции тепловых сетей исходя из полученных капитальных вложений. Полученные данные показывают, что в период с 2023 до 2040 года объема финансирования хватит на перекладку 50 947 м² материальной характеристики тепловых сетей или 9,7 % от общей материальной характеристики тепловых сетей в зоне действия ЕТО-1. Среднегодовой объем перекладки с 2023 по 2040 год составит 0,5 % от существующей материальной характеристики тепловых сетей в зоне действия ЕТО-1. При этом средний срок службы тепловых сетей увеличится с 35 до 49 лет, а повреждаемость возрастет с 1036 до 1490 (на 44 %). Данные показатели однозначно свидетельствуют о недостаточном прогнозируемом объеме реконструкций тепловых сетей для поддержания надежного теплоснабжения потребителей в городе при существующей системе тарифного регулирования.

Исходя из условия недопущения деградации технического состояния тепловых сетей были выполнены расчеты необходимого объема перекладки тепловых сетей. На основании выполненных расчетов можно сделать вывод, что необходимый объем реконструкции тепловых сетей до 2040 года должен составить не менее 317 326 м² материальной характеристики тепловых сетей или 60,5 % от существующей материальной характеристики тепловых сетей в зоне действия ЕТО-1. В таком случае среднегодовой объем перекладки тепловых сетей составит 3,4% от общей материальной характеристики тепловых сетей в зоне действия ЕТО-1. В таком случае можно ожидать снижение к 2040 году среднего срока службы тепловых сетей с 35 до 30 лет и небольшого сокращения повреждаемости тепловых сетей с 1017 до 993 (на 2,3 %) за счет перекладки наиболее проблемных участков тепловых сетей.

Анализ выполненных расчетов позволяет сделать вывод о необходимости увеличения объема финансирования тепловых сетей в 6 раз по сравнению с текущими капитальными вложениями до 68,3 млрд. руб. При сохранении финансирования в рамках существующего тарифного регулирования недофинансирование мероприятий по перекладке тепловых сетей в период с 2023 года до 2040 года составит 56,8 млрд. руб. По итогам расчета можно сделать вывод о необходимости увеличения тарифа для конечного потребителя в период с 2023 по 2040 годы на

121 – 427 рублей за 1 Гкал (рост на 7,0 – 20,6 %), что недопустимо при существующем тарифном регулировании.

Для решения проблемы недофинансирования объектов теплоснабжения в г. Омск выполнен анализ тарифных последствий от перехода на тариф «альтернативной котельной».

В соответствии со ст. 23.3 ФЗ от 27 июля 2010 г. N 190-ФЗ "О теплоснабжении" (с изменениями и дополнениями):

1. К ценовым зонам теплоснабжения могут быть отнесены поселения, городской округ, соответствующие следующим критериям:

1) наличие утвержденной схемы теплоснабжения поселения, городского округа;

2) пятьдесят и более процентов суммарной установленной мощности источников тепловой энергии, указанных в схеме теплоснабжения, составляют источники тепловой энергии, функционирующие в режиме комбинированной выработки электрической и тепловой энергии;

3) наличие совместного обращения в Правительство Российской Федерации об отнесении поселения, городского округа к ценовой зоне теплоснабжения от исполнительно-распорядительного органа муниципального образования и единой теплоснабжающей организации

Расчет тарифа ценовой зоны с учетом периода доведения уровня существующего тарифа до уровня тарифа альтернативной котельной (топливо – природный газ, уголь, мазут) в период 2022 – 2040 гг. приведен в табл. 1.

Таблица 1. Расчет тарифа ценовой зоны для ЕТО-1

№ п/п	Показатели	Ед. изм.	2023	2027	2031	2035	2040
1	Вид топлива, преобладающий в системе теплоснабжения в течение периода	-	уголь	уголь	уголь	уголь	уголь
2	Утвержденный тариф с учетом индексов МЭР	руб/Гкал	1 722,0	2 006,7	2 302,7	2 591,7	3 004,5
3	Разница тарифа альткотельной (строчка "4") и утвержденного тарифа с учетом индексов МЭР (строчка "2")	руб/Гкал	734,1	855,5	981,7	1 104,9	1 280,9
4	Тариф альткотельной, соответствующий преобладающему виду топлива в зоне действия ЕТО	руб/Гкал	2 456,1	2 862,2	3 284,5	3 696,7	4 285,5
5	Тариф альткотельной с учетом периода доведения утвержденного тарифа до уровня тарифа альткотельной	руб/Гкал	1 868,8	2 862,2	3 284,5	3 696,7	4 285,5

Выполненный расчет эффекта от перехода в ценовую зону г. Омска показывает, что переход на тариф альткотельной позволит получить в целом по городу дополнительный приток денежных средств в сферу теплоснабжения на уровне 228,752 млрд. руб. с НДС до 2040 года, что позволит нарастить объемы мероприятий по реконструкции объектов теплоснабжения и значительно повысить надежность и качество централизованного теплоснабжения в городе.

УДК 621.3.019.3

С.И. ШУВАЛОВ, д.т.н., профессор
С.Д. ГОРШЕНИН, к.т.н.,
Е.М. ЩАНИЦЫН, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
E-mail: ShuvalovS@rambler.ru

О связи между остаточной деформацией и категориями повреждения металла при ползучести

Аннотация. В работе рассмотрены механизмы разрушения металла при высокотемпературной ползучести, обоснована взаимосвязь остаточной деформации и категорий повреждения металла и показана причина отсутствия видимой связи в экспериментальных данных.

Ключевые слова: ползучесть металла, остаточная деформация, категории повреждения металла, цензурированные выборки.

S.I. SHUVALOV, Doctor of Sciences,
S.D. GORSHENIN, Candidate of Sciences,
E.M. SCHANITZYN, Postgraduate

Ivanovo State Power University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya, 34
E-mail: ShuvalovS@rambler.ru

On the Relationship between Residual Deformation and Metal Damage Categories during creep

Abstract. The paper considers the mechanisms of metal fracture during high-temperature creep, substantiates the relationship between the residual strain and the damage categories of the metal and shows the reason for the lack of a visible relationship in the experimental data.

Key words: metal creep, permanent deformation, metal damage categories, censored samples.

Основной причиной разрушения элементов теплоэнергетического оборудования, работающего при высоких температурах, является ползучесть металла, приводящая к появлению в металле пор и микротрещин [1-4]. Критическим признаком, при котором недопустима дальнейшая эксплуатация оборудования, является присутствие в металле цепочек слипшихся микропор длиной выше определенного предела и микротрещин в пределах нескольких зерен [5].

Уровень микроповрежденности металла оценивается с помощью оптического микроскопа по шлифам поверхности исследуемого элемента оборудования или репликам этих шлифов и является трудоемкой операцией [6].

Поврежденность микроструктуры оценивается по бальной шкале в зависимости от отсутствия или наличия пор и микротрещин, а также по плотности содержания пор в металле [7]. При первом балле поврежденности поры отсутствуют, появление в металле только единичных пор в зависимости от их количества и размера оценивается со второго по четвертый балл поврежденности, появление цепочек микропор соответствует пятому и шестому баллу, при обнаружении микротрещин поврежденность металла относят к седьмому баллу.

Вторым признаком, при котором дальнейшая эксплуатация оборудования недопустима, является деформация элементов оборудования выше допустимых значений [5]. Для стали 12X1MФ предельной является деформация 0,8%, для стали 15X1M1Ф – 0,6%. Измерение остаточной деформации по сравнению с анализом микроструктуры менее трудоемко и значительно проще.

Согласно нормативным материалам [5] проведение микроструктурного анализа металла деталей, работающих в условиях ползучести, является обязательным только после выработки паркового ресурса, назначаемого заводом-изготовителем и до этого момента можно ограничиться только измерением остаточной деформации.

В [8] была попытка связать величину остаточной деформации с категориями повреждения микроструктуры металла гибов паропроводов. В качестве базы для статистического анализа были взяты результаты диагностики гибов паропроводов острого пара и горячего промперегрева блоков №1 и №2 Рязанской ГРЭС, полученные за период эксплуатации оборудования с 1974 г. по 2010 г. В результате анализа было выявлено, что эта зависимость существует, но она является не детерминированной, а вероятностной.

В табл.1 приведены значения вероятности появления баллов микроповрежденности металла, рассчитанные по [8] для нескольких значений остаточной деформации.

В [9] представлены экспериментальные данные об изменении микроструктуры металла, работающего в условиях ползучести, и приведенная на рис. 1. зависимость поврежденности металла от скорости деформации. На основании этого делается вывод об отсутствии

связи между поврежденностью микроструктуры и деформацией, что не согласуется с результатами работы [8].

Таблица 1. Вероятность поврежденности микроструктуры металла

		Остаточная деформация, %						
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Баллы поврежденности структуры	1	1	0,657	0,273	0,116	0,079	0,073	0,064
	2	0	0,327	0,427	0,242	0,169	0,143	0,114
	3	0	0,016	0,193	0,213	0,175	0,323	0,098
	4	0	0	0,107	0,369	0,529	0,258	0,249
	>4	0	0	0	0,06	0,048	0,203	0,475

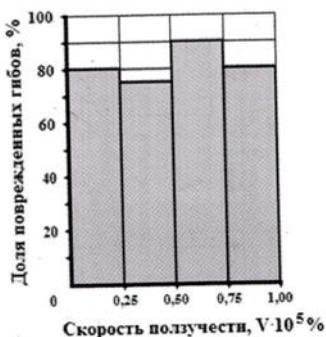


Рис. 1. Влияние деформации на повреждаемость гивов паропроводов

Не сомневаясь в корректности статистической обработки [8] и высочайшей квалификации авторов работы [9], отметим очень высокую долю (около 80%) поврежденных паропроводов при анализе представленной зависимости. В работе [9] не указано, но можно предположить, что структура поврежденного металла соответствует 4 и 5 баллу. Это означает, что база данных, по которой была построена диаграмма на рис.2, содержала результаты обследования только длительно эксплуатируемых трубопроводов. Согласно данным табл.1 при остаточной деформации 0,2 % в базе данных может оказаться до 10% гивов с четвертым баллом поврежденности.

В работе [8] использовались данные диагностики состояния гивов с момента пуска оборудования в 1974 г. до результатов проведения анализа в 2011 году, когда парковый ресурс трубопроводов был исчерпан. Поэтому вывод о зависимости поврежденности металла при ползучести от величины остаточной деформации, сделанный в [8], представляется более обоснованным, чем вывод [9] об отсутствии такой зависимости.

Литература

1. Качанов Л.М. Теория ползучести. – М.: Физматгиз, 1960. – 456 с.
2. Гарофало Ф. Законы ползучести и длительной прочности металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1968. – 304 с.
3. Й. Чадек. Ползучесть металлических материалов. М.: Мир, 1987. – 304 с.
4. Хажинский Г.М. Модели деформирования и разрушения металлов. – М.: Научный мир, 2011. – 231 с.

5. СТО 17230282.27.100.005-2008. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования. М.: ОАО «ВТИ», 2008. – 657 с.

6. СО 153-34.17.456-2003. Методические указания по оценке живучести оборудования тепловых электростанций. – М.: ЦПТИТО ОРГРЭС, 2005. – 99 с.

7. Методы оценки работоспособности паропроводов острого пара после длительных сроков эксплуатации / Ю. М. Гофман, В. С. Пермикин, А. М. Филиппов [и др.] // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. — С. 371-378.

8. Митюшов А.А., Коровин Д.И., Шувалов С.И. Зависимость микроповрежденности стали паропроводов от величины остаточной деформации //Вестник ИГЭУ, вып.2, 2012, с. 12 – 15.

9. Минц И.И., Ходыкина Л.Е., Логвиненко И.Г. Повреждаемость и технологические дефекты в металле высокотемпературных паропроводов. - Челябинск: Цицеро, 2009. – 163 с.

УДК 621.311.22

А.Е. БАРОЧКИН к.т.н., доцент,
О.М. ДАНИЛОВ, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: danilovoleg463@yandex.ru

Обоснование организации централизованного теплоснабжения в г. Иркутск от Иркутской ТЭЦ-10

Аннотация. В работе рассмотрен проект организации централизованного теплоснабжения в г. Иркутск от Иркутской ТЭЦ-10, которая расположена в г. Ангарск. Проект направлен на улучшение технико-экономических показателей работы ТЭЦ-10, за счет дополнительной загрузки теплофикационного оборудования станции, а также на повышение надежности теплоснабжения потребителей в г. Иркутск, подключенных в настоящее время к котельной северного промышленного узла (СПУ). Рассмотрены этапы реализации проекта, обоснованы необходимые мероприятия, выполнен расчет перспективных показателей работы ТЭЦ-10, а также определены показатели экономической эффективности проекта.

Ключевые слова: централизованное теплоснабжение, технико-экономические показатели работы, ТЭЦ, теплофикационная турбина.

A.E. BAROCHKIN Candidate of Engineering, associate professor,
O.M.DANILOV student

Ivanovo State Power University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: danilovoleg463@yandex.ru

Justification of the organization of centralized heat supply in Irkutsk from Irkutsk CHP-10

Annotation. The paper considers the project of organization of centralized heat supply in Irkutsk from Irkutsk CHP-10, which is located in Angarsk. The project is aimed at improving the technical and economic indicators of the operation of CHP-10, due to additional loading of the station's heating equipment, as well as improving the reliability of heat supply to consumers in Irkutsk, currently connected to the boiler house of the northern industrial hub (SPU). The stages of the project implementation are considered, the necessary measures are justified, the calculation of the prospective performance indicators of the CHP-10 is carried out, and the indicators of the economic efficiency of the project are determined.

Key words: centralized heat supply, technical and economic performance indicators, thermal power plant, heating turbine

Иркутская ТЭЦ-10 расположена в г. Ангарск. Установленная электрическая мощность станции составляет 1110 МВт, тепловая мощность - 574 Гкал/ч. Коэффициент использования установленной электрической мощности составляет 30,77 %, тепловой – 9,23 %.

В настоящее время Иркутская ТЭЦ-10 работает на подпитку теплотрассы, что обуславливает незначительную тепловую нагрузку станции в горячей воде. Авторами статьи был проработан вариант увеличения загрузки теплофикационного оборудования ТЭЦ за счет строительства тепломагистрали в соседний город Иркутск.

На первом этапе планируется выполнить строительство тепломагистрали от ТЭЦ-10 до п. Малая Еланка (находится за пределами г. Иркутск) для подключения перспективных тепловых нагрузок новых потребителей с суммарной нагрузкой 120 Гкал/ч. На втором этапе реализации проекта рассматривается возможность продлить тепломагистраль от п. Малая Еланка до котельной Северного промузла (КСПУ) в г. Иркутск для переключения тепловой нагрузки существующих потребителей котельной на Иркутскую ТЭЦ-10 с переводом котельной СПУ в пиковый режим работы.

Таблица 1. Перспективные технико-экономические показатели работы Иркутской ТЭЦ-10 при реализации этапа № 1 проекта «ЮГ»

Показатель	Един. изм.	Период прогнозирования				
		2022	2027	2028	2029	2030
Отпуск тепловой энергии с коллекторов	тыс. Гкал	434,842	537,772	729,928	1011,31	1644,08
Отпуск электрической энергии	тыс. МВт-ч	2458,0	2716,4	2716,4	2716,4	2716,4
Затрачено условного топлива	тыс. т у.т	1048,7	1091,3	1073,4	1047,2	1147,7
УРУТ на отпуск электрической энергии	г/кВт-ч	398,4	336,4	320,1	296,2	296,5
УРУТ на отпуск тепловой энергии	кг/Гкал	159,7	162,0	161,6	161,1	159,8

Для определения основных технических характеристик и формирования перечня дополнительных мероприятий на тепловых сетях был

выполнен гидравлический расчет перспективной тепломагистрали в электронной модели тепловых сетей г. Иркутск в программном комплексе ZuluThermo. На основании расчетов был сформирован следующий перечень мероприятий для реализации первого и второго этапов.

1 этап (подключение перспективной застройки в п. М.Еланка) включает:

- новое строительство тепломагистрали от Иркутской ТЭЦ-10 до п. М.Еланка диаметром 600-800 мм и длиной 13,4 км в двухтрубном исполнении.

- строительство на территории ТЭЦ-10 насосной станции на подающем трубопроводе новой тепломагистрали производительностью 4000 м³/ч.

2 этап (переключение тепловой нагрузки котельной СПУ на ТЭЦ-10) включает:

- новое строительство тепломагистрали от п. М.Еланка до котельной СПУ в г. Иркутск диаметром 800 мм и длиной 6,9 км в двухтрубном исполнении.

- строительство насосных станций на подающем и обратном трубопроводах новой тепломагистрали диаметром 800 мм в районе отвода на п. М.Еланка производительностью 4000 м³/ч.

Для оценки возможности реализации проект выполнен расчет стоимости необходимых мероприятий, тепловых балансов ТЭЦ-10 при подключении дополнительной тепловой нагрузки, технико-экономических показателей работы ТЭЦ-10 и показателей экономической эффективности проекта. Сводные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2. **Выводы по результатам расчета проекта**

Наименование этапа	Подключаемая тепловая нагрузка, Гкал/ч	Стоимость реализации с НДС, млрд.руб	Ограничения
Этап №1 Подключение перспективной застройки в п. М.Еланка	Договорная -120 Расчетная-86	2,931	Отсутствуют
	Вывод: может быть реализован в период 2023-2026 гг.		
Этап №2 Переключение потребителей котельной СПУ	Договорная - 290 Расчетная - 245	2,409	Нехватка резерва тепловой мощности (+33 Гкал/ч)
	Вывод: необходима установка нового теплогенерирующего оборудования на ТЭЦ-10 для увеличения располагаемой тепловой мощности. Сроки реализации не определены.		
Этап №1 + Этап №2	Договорная -410 Расчетная-331	5,340	Нехватка резерва тепловой мощности (+123 Гкал/ч)
	Вывод: необходима установка нового теплогенерирующего оборудования на ТЭЦ-10 для увеличения располагаемой тепловой мощности. Сроки реализации не определены.		

На основании выполненных расчетов сделан вывод о нецелесообразности реализации второго этапа проект «Юг» в период до 2030 года по причине отсутствия резерва тепловой мощности на Иркутской ТЭЦ-10. Блоки оборудованы конденсационными турбинами К-150, не предназначенными для выдачи тепла в режиме работы с номинальной электрической мощностью. Поскольку на ТЭЦ-10 до 2030 года не планируются мероприятия по установке нового теплогенерирующего оборудования, то предлагается сдвинуть реализацию второго этапа проекта на более поздний период (после 2030 года) и синхронизировать его с разработкой мероприятий по установке нового теплогенерирующего оборудования на Иркутской ТЭЦ-10, которые позволят увеличить резерв тепловой мощности станции

УДК 621.311.22

С.А. ПАНКОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Интерактивное учебное пособие для изучения конструкций основного и вспомогательного оборудования энергоблока большой мощности

Аннотация. Разработанное интерактивное учебное пособие содержит основные технологические схемы энергоблока, турбоустановки и ее основных систем. Более пятидесяти чертежей основного и вспомогательного оборудования. Все разрезы на чертежах выполнены в цвете с обозначением отдельных деталей, с описанием конструкции и техническими характеристиками. Для основного технологического оборудования возможно подключение видеofайлов, иллюстрирующих работу оборудования. Кроме того, возможно подключение математического аппарата для выполнения тепловых и прочностных расчетов. По окончании изучения каждого раздела предлагается список контрольных вопросов и предусмотрен автоматизированный контроль знаний.

Ключевые слова: энергоблок, паровая турбина, тепловая схема, котел, подогреватель, конденсатор, насос, регулирующий клапан, конструкция.

S.A. PANKOV Candidate of Engineering, associate professor

Ivanovo State Power University,
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Interactive tutorial for studying the designs of the main and auxiliary equipment of a high-power power unit

Abstract. The developed interactive textbook contains the main technological schemes of the power unit, turbine unit and its main systems. More than fifty drawings of the main and auxiliary equipment. All sections in the drawings are made in color with the designation of individual parts, with a description of the design and technical characteristics. For the main technological equipment, it is possible to connect video files illustrating the operation of the equipment. In addition, it is possible to connect a mathematical apparatus for performing thermal and strength calculations. At the end of the study of each section, a list of control questions is proposed and automated knowledge control is provided.

Key words: power unit, steam turbine, thermal circuit, boiler, heater, condenser, pump, control valve, design.

Доля выработки электрической энергии тепловыми электрическими станциями (ТЭС) на органическом топливе в общей выработке электрогенерации Российской Федерации составляет более 60%, а примерно половину этой мощности обеспечивают блочные конденсационные станции - ГРЭС, имеющие в своем составе энергоблоки большой мощности на сверхкритические параметры пара. Изучению этого оборудования посвящено большое количество разделов профессиональных дисциплин по направлению подготовки 13.03.01 и 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника с направленностью Тепловые электрические станции.

Несмотря на достаточно большое количество различных источников, в том числе литературы с описанием конструкций основного оборудования и принципа работы ТЭС, найти исчерпывающую информацию в полном объеме весьма сложно. С такой проблемой сталкиваются не только обучающиеся, но и персонал тепловых электростанций. За долгие годы эксплуатации многие чертежи и технологические схемы на бумажных носителях сильно износились и плохо читаются. Поэтому задача восстановления и сохранения в электронном виде чертежей и схем эксплуатируемого оборудования весьма актуальна.

В качестве объекта изучения выбран один из наиболее распространенных на ГРЭС энергоблоков установленной мощностью 300 МВт с турбоустановкой сверхкритического давления типа К-300-23,5 ЛМЗ.

Разработанное интерактивное учебное пособие имеет следующую структуру. Схемы, объединяющие группы оборудования: технологическая схема – поперечный разрез главного корпуса ТЭС (рис. 1), принципиальная тепловая схема энергоблока, схемы маслоснабжения и регулирования турбины и другие.

На каждое выделенное цифрами на схеме оборудование имеется описание конструкции, чертеж и (или) фото, технические характеристики (рис. 2). Для основного технологического оборудования возможно подключение видеофайлов, иллюстрирующих работу оборудования.



Рис. 1. Технологическая схема тепловой электростанции

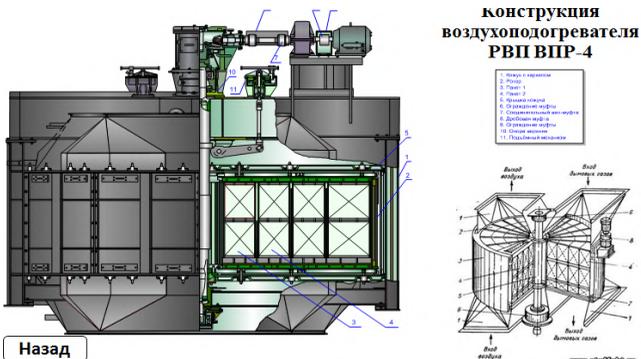


Рис. 2. Чертеж оборудования (11 – воздухоподогреватель)

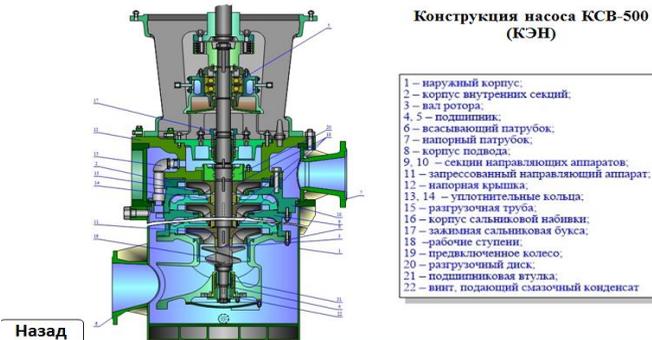


Рис. 3. Конструкция конденсатного насоса

Более пятидесяти чертежей основного и вспомогательного оборудования. Все разрезы на чертежах выполнены в цвете с обозначением отдельных деталей, с описанием конструкции и техническими характеристиками.

Возможно подключение математического аппарата для выполнения тепловых и прочностных расчетов. По окончании изучения каждого раздела предлагается список контрольных вопросов и предусмотрен автоматизированный контроль знаний.

Материал предполагается использовать на практических занятиях в специально оборудованной лаборатории кафедры ТЭС, а также при самостоятельной подготовке обучающихся по соответствующим дисциплинам и направлен на формирование у обучающихся профессиональных компетенций в сфере их будущей профессиональной деятельности.

УДК 621.321

С.Б. ПЛЕТНИКОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: psb@atp.ispu.ru

Создание локальных информационно-управляющих систем (ИУС) на базе контроллера KP-300 и программной среды LabVIEW

Аннотация. В работе представлен разработанный алгоритм взаимодействия «компьютер - контроллер» на базе KP-300 с использованием последовательного интерфейса RS-485/232 и программной среды LabVIEW.

Ключевые слова: микропроцессорный контроллер, программно-аппаратная реализация системы, программный алгоритм.

S.B. PLETNIKOV, Ph.D., Associate Professor

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: psb@atp.ispu.ru

Creation of local information and control systems (ICS) based on the KR-300 controller and the LabVIEW software environment

Annotation. The paper presents the developed algorithm of interaction "computer - controller" based on the KR-300 using the serial interface RS-485/232 and the Software environment LabVIEW.

Keywords: microprocessor controller, software and hardware implementation of the system, software algorithm.

Предложенная технология может использоваться для создания локальных двухуровневых ИУС распределенного типа, состоящих из рабочей (инженерной) станции, реализованной на компьютере IBM PC и операторских станций, выполненных на базе промышленных микропроцессорных контроллеров (МПК) КР-300 «Контраст».

Инженерная станция представляет собой полномасштабную рабочую станцию оператора, реализующую основные функции SCADA-системы. Она обеспечивает верхний уровень управления технологическим процессом с ведением технологических протоколов, трендов и мониторингом технологического процесса.

Программная реализация функций SCADA-системы реализуется в среде графического программирования LabVIEW с применением универсальной структуры построения и функционирования программно-аппаратных комплексов.

Операторские станции реализует нижний уровень управления, при необходимости объединяемые в дейтаграммную локальную управляющую сеть МАГИСТР с конфигурацией «общая шина» и настраиваемой скоростью передачи данных.

Отечественные контроллеры КР-300 обеспечивают сбор и первичную обработку сигналов от датчиков информационной подсистемы и передачу их в компьютер инженерной станции. На этом уровне осуществляется формирование и выдача управляющих воздействий для регулирования основных технологических параметров, контроль технологических параметров, модификация уставок сигнализации и защит, масштабных коэффициентов, параметров настройки регуляторов и т.п. Кроме классических задач регулирования и логического управления контроллер выполняет функции регистрации параметров в оперативной памяти и архивации параметров на флэш-диске с последующей выдачей их на ПЭВМ.

Стандартные аналоговые и дискретные датчики и исполнительные устройства подключаются к КР-300 с помощью индивидуальных кабельных связей. Ввод аналоговых сигналов осуществляется с помощью модулей МАС (по 8 каналов), ввод и вывод дискретных (импульсных) сигналов модулями МДС (по 16 каналов). Для ввода сигналов термпар и термосопротивлений используются внешние преобразователи БУС-10 и БУТ-10 (по 2 канала).

Главной особенностью программно-аппаратной реализации системы является разработка алгоритма (программы) взаимодействия «*компьютер - контроллер*» с использованием последовательного интерфейса RS-485/232 (рис.1,а).

Алгоритм реализован в программной среде LabVIEW с применением встроенных функций приема – передачи данных через последовательный порт (ПП) компьютера. Он включает несколько самостоятельных блоков (модулей):

- прием аналоговых сигналов (АС);
- передача АС;
- прием-передача дискретных сигналов (ДС).

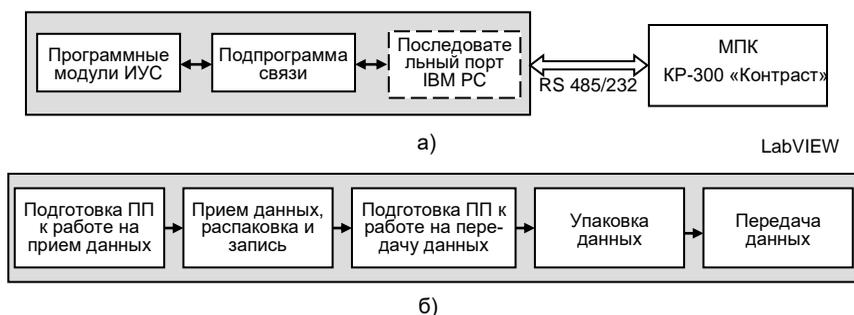


Рис.1. Структура программно-аппаратной реализации ИУС

Укрупненная структура алгоритма приема АС представлена на (рис.1,б).

Программная реализация алгоритма приема данных (аналоговых сигналов) от контроллера, представленная в виде специальной структуры LabVIEW последовательного выполнения кадров «Sequence», более детально отражает последовательность выполнения и состав процедур для работы с ПП компьютера с использованием встроенных функций LabVIEW (рис. 2).

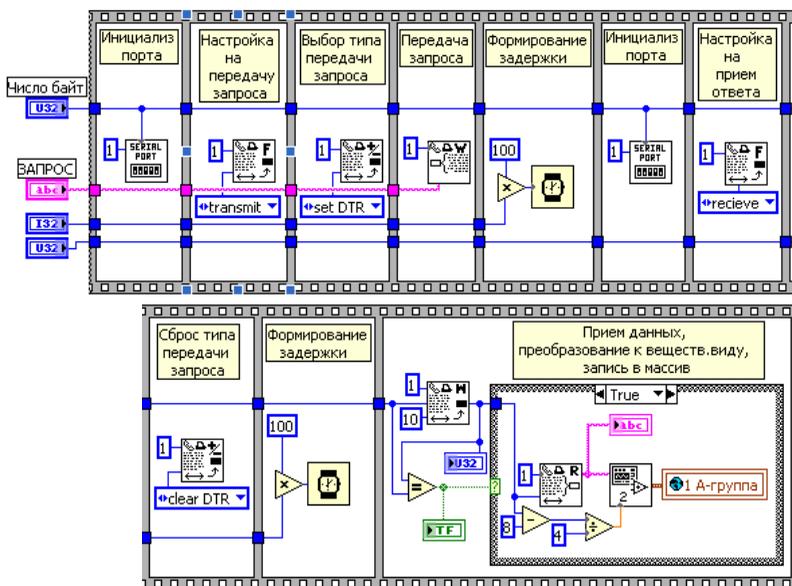


Рис. 2. Фрагмент блок-диаграммы модуля «Прием АС1»

Литература

1. Таланов В.Д., Плетников С.Б., Демин А.М. Модульное конструирование при разработке комплексов по наладке систем автоматического регулирования // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2007. – № 4. – С. 72 – 75.

2. Технология конструирования программно-аппаратных комплексов для наладки систем автоматического регулирования теплоэнергетического оборудования электростанций / Плетников С.Б. // Свидетельство об отраслевой регистрации разработки №8442. – Госкоорцентр, ОФАП, 5.06.2007.

УДК 004.056

С.Г. СТАВРОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
E-mail: jasergeich@yandex.ru

Особенности защиты межсетевого обмена данными в АСУ ТП

Аннотация. Рассмотрены особенности защиты промышленных сетей с использованием межсетевых экранов и ДМЗ.

Ключевые слова: кибербезопасность, АСУ ТП

S.G. STAVROV, PhD, associate professor

Ivanovo State Power University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya 34
E-mail: jasergeich@yandex.ru

Protection of the inter-network data exchange in industrial control systems

Abstract. Protection of industrial networks with firewalls and DMZ is considered.

Key words: cybersecurity, industrial control systems

Проблемы обеспечения информационной безопасности АСУ ТП на предприятиях, сети которых объединяют промышленный и корпоративный сегменты с выходом в глобальную сеть Интернет, могут быть обусловлены внешними угрозами.

Сценарии развития кибератак через Интернет включают проникновение в корпоративную сеть с дальнейшим распространением в промышленную сеть.

Для создания внешней защиты промышленной сети могут быть использованы известные и принятые подходы, связанные с использованием межсетевых экранов (МЭ), разделением сети на зоны с различным уровнем безопасности и организацией демилитаризованных зон (ДМЗ).

В отношении обеспечения безопасности промышленных систем выделяют две большие зоны:

- Корпоративная зона безопасности;
- Промышленная зона безопасности.

Рассмотрим варианты архитектуры безопасной промышленной сети [1].

1. *МЭ между корпоративной и промышленной сетью*, рис. 1. В данной схеме дополнительные риски могут возникнуть вследствие необходимости расположения в одном из сегментов тех компонентов сети (например, сервер архива данных), к которым нужен доступ из обоих сегментов. Эти компоненты целесообразно поместить в демилитаризованную зону.

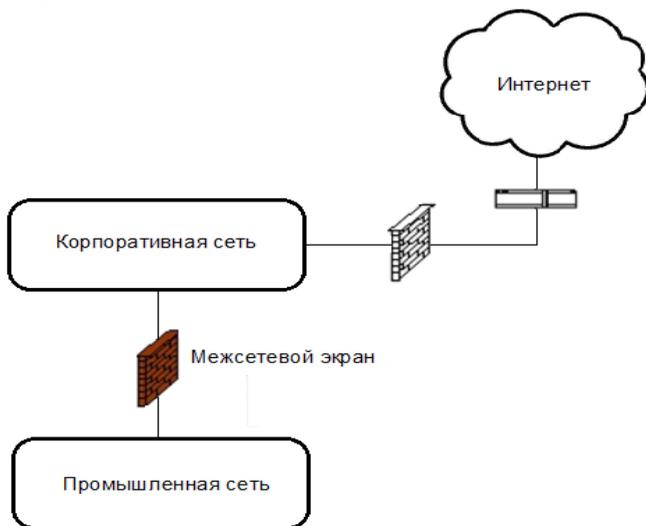


Рис. 1. Межсетевой экран между корпоративной и промышленной сетью

2. *ДМЗ с одним МЭ*, рис. 2. Подобно первой схеме, данная конфигурация предъявляет повышенные требования к настройке и администрированию межсетевого экрана, т.к. в случае его взлома или ошибки в настройках промышленная сеть окажется уязвимой напрямую из корпоративной сети.

3. *ДМЗ с двумя МЭ*, рис. 3. Это наиболее безопасный подход, в котором один из МЭ контролирует соединения из корпоративной сети в ДМЗ, второй – из ДМЗ в промышленную сеть. В таком случае для успешной атаки на промышленную сеть должны быть скомпрометированы оба устройства, что затрудняет эту задачу.

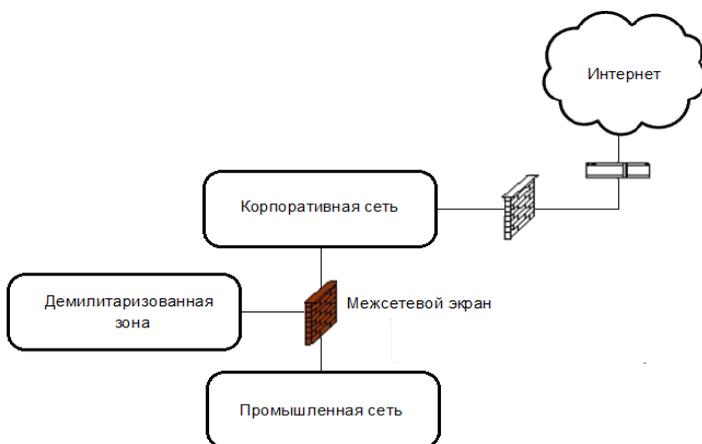


Рис. 2. Демилитаризованная зона с одним межсетевым экраном

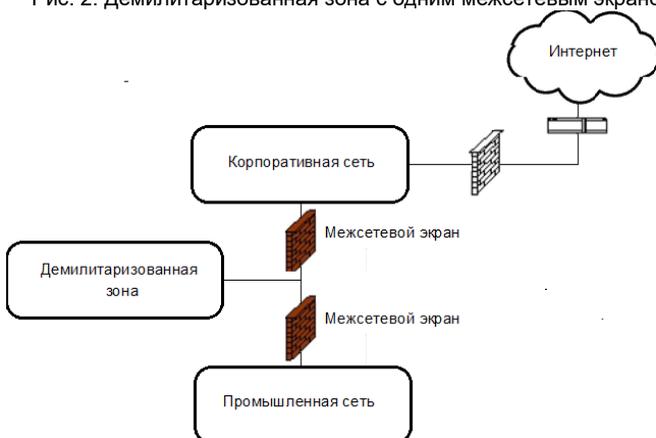


Рис. 3. Демилитаризованная зона с двумя межсетевыми экранами

Рассмотренные схемы планируется использовать в учебном процессе ИГЭУ в качестве примеров моделирования сетей с помощью компьютерных симуляторов при изучении сетевой безопасности в системах промышленной автоматизации.

Список литературы

1. NIST SP 800-82, Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security, 2008.
2. DMZ (компьютерные сети) [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/DMZ_\(компьютерные_сети\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/DMZ_(компьютерные_сети))

УДК 620.4: 621.438.082.2

В.Д. БУРОВ, к.т.н., профессор,
А.Р. БОГДАН, ген. директор ООО «ЕМВ фильтртехник рус»,
В.И. БЫЛИЧКИН, упр. директор ООО «Пауэр Инжиниринг Технолоджиз»

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
11250, г. Москва, Красноказарменная улица, 14
E-mail: burovvd@mail.ru

Выбор системы фильтрации КВОУ энергетических ГТУ

Аннотация. Исследован вопрос подхода в выборе системы фильтрации комплексного воздухоочистительного устройства (КВОУ) энергетических газотурбинных установок (ГТУ).

Ключевые слова: газотурбинная установка, воздушный фильтр, осевой компрессор (ОК), комплексное воздухоочистительное устройство.

V.D. BUROV, Ph.D., Professor,
A.R. BOGDAN, general director LLC «EMW filtertechnik rus»,
V.I. BYLICHKIN, managing director LLC «Power Engineering Technologies»

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
111250, Moscow, Krasnokazarmennay ulica, 14
E-mail: burovvd@mail.ru

Selection of a filtration system for KVOU of power gas turbines

Аннотация. The question of the approach to the choice of the filtration system of the integrated air-cleaning device (KVOU) of power gas turbine units (GTU) has been studied.

Ключевые слова: gas turbine unite, air filter, axial compressor (AC), filter house.

Система фильтрации воздуха необходима для любой газотурбинной установки. Системы фильтрации превратились из простых систем удаления твёрдых частиц в сложные системы, позволяющие улавливать как твёрдые, так и жидкие частицы из поступающего воздуха. Технологии систем фильтрации постепенно развивались, поскольку газовые турбины становятся всё более чувствительными к поступающим частицам. Это связано с увеличением рабочих температур и уменьшением допусков в современных турбинах. Современная система фильтрации имеет несколько ступеней, которые выбираются для конкретной среды и сферы применения.

Подготовка рабочего тела является важнейшим вопросом эксплуатации ГТУ. Поскольку основной частью рабочего тела ГТУ является воздух. Низкое качество поступающего воздуха может значительно повлиять на режим, эксплуатационные характеристики и сроки эксплуатации газовой турбины. Одними из последствий ненадлежащей филь-

трации воздуха являются загрязнение, эрозия и коррозия проточной части ОК и ГТУ.

Первым шагом при выборе системы фильтрации воздуха является определение характеристик внешних условий в месте установки ГТУ. Данный этап включает в себя определение потенциальных загрязняющих веществ, которые могут присутствовать на площадке установки системы. Систему фильтрации следует выбирать в зависимости от веществ, которые необходимо удалить из воздуха, и требований к качеству воздуха на входе в газовую турбину. Существует несколько различных систем фильтрации, которые можно использовать для защиты ГТУ [1]. Большинство современных систем фильтрации представляют собой многоступенчатые системы, которые позволяют удерживать различные виды загрязняющих веществ (рис. 1).

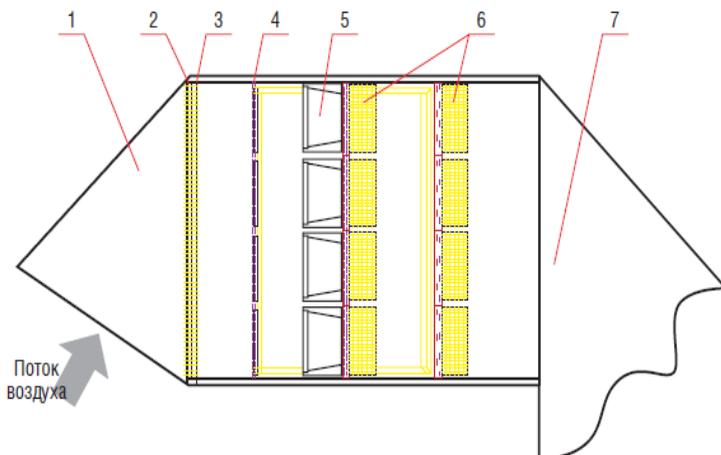


Рис. 1. Комплексное воздухоочистительное устройство (КВОУ):

- 1 – погодные козырьки; 2 – противобледенительная система и система охлаждения воздуха; 3 – сетка для защиты от птиц и насекомых;
- 4 – фильтр-влажнотделитель; 5 – фильтр грубой очистки (ФГО);
- 6 – фильтр тонкой очистки (ФТО); 7 – шибер

На сегодняшний день для газовых турбин средней и большой мощности, поставляемых в Россию, стандартная комплектация КВОУ включает в себя системы фильтрации классов G4 – F8/F9 согласно ГОСТ Р ЕН 779-2014 [2]. Устанавливаемая в настоящее время система воздухоподготовки на современные ГТУ в Российской Федерации не является достаточно эффективной. Данные решения считались эффективными 10-15 лет назад до появления высокоэффективных систем фильтрации, которые полностью изменили подход к пониманию способов защиты двигателя от загрязнения.

Согласно данным страховых агентств для ГТУ мощностью менее 170 МВт около 50% всех неполадок связаны с работой силовой турбины, в то время как на проблемы компрессорной части приходится лишь 12% от всех неисправностей. В ГТУ нового поколения с мощностью более 220 МВт, проблемная область перешла на компрессор, на который приходится около 35% от общего количества неполадок [3]. Современные газовые турбины требуют большей защиты, то есть применения более эффективных систем фильтрации.

Для того чтобы понимать критерии подбора правильной системы фильтрации, необходимо иметь представление о степени концентрации частиц пыли в воздухе, а также о том, каким образом можно оценить эффективность работы фильтрующих элементов. При этом, при выборе системы фильтрации необходимо руководствоваться двумя аспектами. Первый аспект – количество пыли, которое попадает в ГТУ. То есть, при рассмотрении критериев оценки фильтров нужно в первую очередь принимать во внимание процент частиц, которые пропускаются фильтром. Вторым не менее важным аспектом при выборе системы фильтрации является размер частиц пыли, который способен уловить воздушный фильтр. Таким образом, фильтры, выбранные по критерию массы, смогут задерживать лишь небольшое количество крупной пыли и пропускать мелкую, которая и является основным источником загрязнения компрессора газовой турбины.

Вывод: в настоящее время при выборе фильтров КВОУ в основном используются штатные технические решение, рекомендованные заводами-изготовителями ГТУ. Учитывая значительные затраты на покупку фильтров, а также их влияние на вырабатываемую мощность ГТУ, целесообразно найти оптимальное техническое решение в отношении цена/качество, с учетом индивидуальных характеристик воздуха в месторасположении площадки ТЭС.

Литература

1. Газотурбинные энергетические установки/ С.В.Цанев, В.Д.Буров, А.С.Земцов, А.С. Осыка; под ред. проф. В.Д.Бурова–М.Издательский дом МЭИ, 2022.
2. ГОСТ Р ЕН 779-2014. Фильтры очистки воздуха общего назначения, 2014.
3. Юрген Шваб. Основные принципы фильтрации для газовых турбин / Турбины и Дизели. 2008, №4. С. 28-33.

Подсекция
**«ТЕХНОЛОГИЯ ВОДЫ И ТОПЛИВА НА ТЕПЛОВЫХ
И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ»**

УДК 621.321

Е.Н. БУШУЕВ, д.т.н., доцент,
А.Ю. ЛОГИНОВА, аспирант,
А.В. ПЕКУНОВА, ассистент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

**Анализ схемы подготовки исходной воды
для обратного осмоса на основе методов коагуляции
с известкованием в осветлителе и ультрафильтрации**

Аннотация. Выполнен анализ схемы подготовки исходной воды для установки обратного осмоса на основе методов коагуляции с известкованием в осветлителе и ультрафильтрации, входе которого, определены основные преимущества и недостатки этой схемы предочистки.

Ключевые слова: ТЭС, водоподготовка, предочистка, мембранные методы, технологический расчёт

E.N. BUSHUEV, Doctor of Technical Sciences,
A.Yu. LOGINOVA, post-graduate student
A.V. PEKUNOVA, assistant,

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

**Analysis of the source water treatment scheme
for reverse osmosis based on coagulation methods
with liming in clarifier and ultrafiltration**

Annotation. The analysis of the source water treatment scheme for the reverse osmosis plant based on the methods of coagulation with liming in the clarifier and ultrafiltration was carried out, the main advantages and disadvantages of this pre-treatment scheme were identified.

Key words: TPP, water treatment, pretreatment, membrane methods, technological calculation

При проектировании водоподготовительных установок (ВПУ) на ТЭС и АЭС в схемах обработки воды предусматривают ступени очистки на базе мембранных методов и, прежде всего обратного осмоса [1]. Для

эффективного использования установки обратного осмоса (УОО) необходимо, чтобы в поступающей воде практически отсутствовали коллоидные и грубодисперсные соединения, кроме того, ограничено содержание примесей, которые могут образовывать на поверхности мембраны малорастворимые вещества и, прежде всего карбонат кальция [2].

Для подготовки исходной воды перед УОО наиболее часто реализуется схема, включающая ступень механических (сетчатых или дисковых) фильтров и установка ультрафильтрации (УУФ) [1, 2]. В случае необходимости, для предотвращения образования отложений на поверхности обратноосмотических мембран предусматривается обработка осветлённой воды методами подкисления, умягчения на Na-катионитном фильтре или добавление антискалянта.

На ВПУ Новочеркасской ГРЭС в качестве схемы для подготовки исходной воды перед УОО используется комбинированная схема, сочетающая традиционные и мембранные технологии предочистки (рис. 1) [3] и предусматривающая коагуляцию с известкованием в осветлителе, с последующим двухступенчатым механическим фильтрованием на насыпных фильтрах, при использовании в качестве загрузки антрацит. Получаемая осветлённая вода далее очищается методом ультрафильтрации. Вода после промывки модулей УУФ направляются на вход осветлителей.

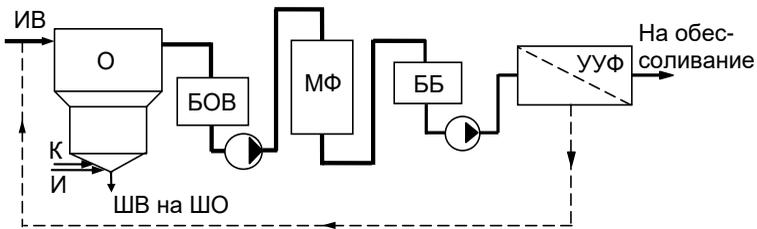


Рис. 1. Схема предочистки на основе коагуляции и известкования в осветлителе и УУФ:

ИВ – исходная вода; О – осветлитель; К, И – ввод растворов коагулянта и извести; ШВ – шламовые воды; ШО – шламоотвал;
БОВ – бак осветлённой воды; МФ – механический фильтр; ББ – буферный бак

Авторами с использованием разработанной компьютерной программы "ПРОЕКТ ВПУ" [4] был выполнен технологический расчёт комбинированной схемы предочистки (рис. 2), определены основные технологические, экологические и технико-экономические показатели работы ВПУ. На основе полученных результатов расчёта проведён анализ этой схемы подготовки исходной воды для УОО с целью выявления преимуществ и недостатков этого технического решения.

Рассмотренная комбинированная схема предочистки включающая традиционные и мембранные технологии предочистки позволяет

надёжно получить осветлённую воду с низким содержанием коллоидных и грубодисперсных примесей, что обеспечивает благоприятные условия работы УОО. По сравнению со схемой, включающей только ультрафильтрацию, уменьшается расход воды на собственные нужды с 8–10 до 2,4–3,0 %. Кроме того, снижаются общие жёсткость и щёлочность осветлённой воды, что уменьшает вероятность образования отложений солей жёсткости на поверхности обратноосмотических мембран и может способствовать повышению допустимой степени концентрирования на УОО. Высокое значение показателя рН в осветлённой воде может привести к образованию карбоната кальция и гидроксида магния, поэтому очищенную воду перед УОО потребует подкислять.

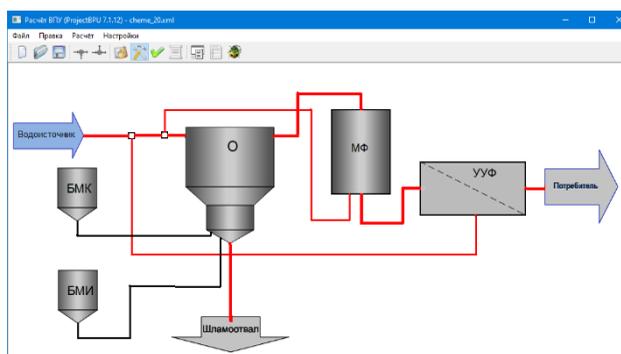


Рис. 2. Экранная форма расчётной схемы предочистки в компьютерной программе "ПРОЕКТ ВПУ"

К недостаткам комбинированной схемы предочистки следует отнести:

- наличие известкования природной воды требует использования "грязного" реагентного хозяйства;
- схема содержит повышенное количество водоподготовительного оборудования.

Вывод: таким образом, схема подготовки исходной воды для установки обратного осмоса на основе методов коагуляции с известкованием в осветлителе и ультрафильтрации хотя и содержит множество водоподготовительного оборудования, но позволяет обеспечить низкое содержание коллоидных и грубодисперсных примесей в осветлённой воде, при этом она характеризуется невысоким расходом воды на собственные нужды.

Литература

1. Бушуев, Е.Н. Анализ современных технологий водоподготовки на ТЭС / Е.Н. Бушуев, Н.А. Еремина, А.В. Жадан // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. –2013. –Вып. 1. –С. 8–14.

2. Бушуев Е.Н. Технология обессоливания воды на ТЭС на основе мембранных методов: Учеб. пособие / Е.Н. Бушуев, Н.В. Бушуева // ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2017. –144 с.

3. Громов С.Л. Осадкообразование в рулонных обратноосмотических и нанофильтрационных элементах и способы его предотвращения / С.Л. Громов // Теплоэнергетика. 2014. №6. С. 49–58.

4. Технологический расчет водоподготовительной установки ТЭС и АЭС (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ) / Е.Н. Бушуев // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2016663460. Дата поступления 17 октября 2016 г., зарегистрировано 7 декабря 2016 г.

УДК 621.321

Е.А. КАРПЫЧЕВ, к.т.н., доцент,
Д.О. ЛЕБЕДЕВА, магистрант
Т.А. ЦАПЛИНА, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфakovская 34
E-mail: karpuchev3108@bk.ru

Проблемы учета количества извести в системах предварительной очистки ВПУ, работающих в режимах коагуляции с известкованием

Аннотация. Разработан и апробирован регламент оценки и учета количества извести в ячейках мокрого хранения. Определена относительная погрешность представленных методов учета количества извести.

Ключевые слова: учет расхода реагентов, известь гидратная, предпочистка, «известковое молоко», относительная погрешность.

Е.А. KАРPYЧЕV docent, Candidate of Engineering
D.O. LEBEDEVA,
T.A. TSAPLINA, master's student

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: karpuchev3108@bk.ru

Problems of accounting for the amount of lime in pretreatment systems of VPU operating in coagulation modes with liming

Abstract. A regulation for assessing and accounting for the amount of lime in wet storage cells has been developed and tested. The relative error of the presented methods of accounting for the amount of lime is determined.

Key words: reagent consumption accounting, hydrate lime, pretreatment, "lime milk", relative error.

В 2020 году в рамках сотрудничества с химическим цехом ООО «Автозаводская ТЭЦ» г. Нижний Новгород по договору «Разработка методики по определению количества реагентов, находящихся в ячейках мокрого хранения (известь гидратная, железный купорос)» был разработан и апробирован регламент оценки количества реагентов, находящихся на балансе химического цеха, с учетом действующих нормативных документов [1, 2].

Особенностью работы заключалась в том, что реагенты поступают в химических цех в виде «известкового молока» с концентрацией $10,5 \pm 0,2\%$ в пересчете на $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и извести гидратной в соответствии с [3], что осложняет учет расхода указанных реагентов в процессе эксплуатации. Для упрощения задачи было принято решение учет расхода извести пересчитывать на известь гидратную.

Кроме известкования в осветлителях гашеная известь дополнительно, помимо мешалок извести, расходуется на нейтрализацию образующихся кислых стоков ионообменных фильтров. Указанный расход учитывается при сверке прихода и расхода извести.

«Известковое молоко» выгружается непосредственно в творила (3 шт.), а известь гидратная загружается в ячейку мокрого хранения извести. Подача известкового молока в расходные мешалки осуществляется из творил.

Для решения поставленной задачи были рассмотрены следующие способы учета расхода извести:

1. С использованием ежесменных данных об объемах и концентрации рабочих растворов извести в мешалках:

$$G_{\text{изв.}} = \frac{\Delta V^{\text{меш.}} \cdot \omega^{\text{изв.}} \cdot \rho^{\text{изв.}}}{67}, \quad (1)$$

где $\Delta V^{\text{меш.}}$ – объем извести, израсходованный за смену из мешалок, м^3 ; $\omega^{\text{изв.}}$ – массовая доля извести в баке-мернике (в пересчете на $\text{Ca}(\text{OH})_2$), определенная по значению плотности, измеренной ареометром, %; $\rho^{\text{изв.}}$ – плотность раствора извести в мешалках, г/мл ; 67 – отчетное содержание активной CaO в технической извести, %.

2. С использованием фактического объема обрабатываемой воды и средней расчетной дозы извести, определенной с использованием результатов химического анализа воды до и после обработки в режиме известкования с коагуляцией:

$$D_{\text{и}}^{\text{расч.}} = 0,8 \cdot [Mg^{2+}] + \frac{[\text{CO}_2^{\text{исх.}}]}{22} + \text{Щ}_{\text{о}}^{\text{исх.}} + D_{\text{к}} + i_{\text{и}}, \quad (2)$$

$$G_{\text{изв.}} = \frac{V^{\text{исх.}} \cdot D_{\text{и}}^{\text{расч.}} \cdot 37 \cdot 10^{-4}}{67}, \quad (3)$$

где $[Mg^{2+}]$ – магниевая жесткость исходной воды, мг-экв/л ; $[\text{CO}_2^{\text{исх.}}]$ – содержание свободной углекислоты в исходной воде, мг/л ; 22 – эквивалентная масса свободной углекислоты, г/г-экв ; $\text{Щ}_{\text{о}}^{\text{исх.}}$ – щелочность исходной воды, мг-экв/л ; $D_{\text{к}}$ – доза коагулянта, мг-экв/л ; $i_{\text{и}}$ – избыток извести, мг-экв/л ; $V^{\text{исх.}}$ – объем обработанной сырой воды, м^3 ; $D_{\text{и}}^{\text{расч.}}$ – сред-

нее арифметическое значение расчетной дозы извести, мг-экв/л; 37 – эквивалентная масса $\text{Ca}(\text{OH})_2$, г/г-экв.

3. С использованием установленного удельного расхода извести в 200 г/м^3 на обработку исходной воды.

$$G_{\text{изв.}} = \frac{V^{\text{исх.}} \cdot q^{\text{и}} \cdot 10^{-4}}{67}, \quad (4)$$

где $q^{\text{и}}$ – удельный расход извести 200 г/м^3 .

С использованием указанных способов учета расхода извести выполнены расчеты за период с 02.2020 по 03 2020 гг., а полученные результаты сравнены с фактическим поступлением реагентов в химический цех.

Наиболее точным вариантом учета извести в соответствие с результатами, приведенными в табл. 1 является способ учета расхода извести с использованием ежемесячных данных об объемах и концентрации рабочих растворов извести в мешалках.

Таблица 1. Сравнение способов учета расхода извести с фактическим потреблением

№ Метода	1	2	3	Фактическое потребление
Количество извести в пересчете на CaO с $\omega=67\%$	239,6	351,8	280,8	229,6
Относительная погрешность по сравнению с фактическим потреблением, %	4,3	53,2	22,3	-

Руководству химического цеха даны рекомендации списывать известь, приходящую в жидкой и твердой форме, по следующей схеме:

- в первую очередь необходимо списывать известковое молоко (в полном объеме), т. к. оно в существенно меньшем объеме по отношению к гидратной извести приходит на склад извести и направляется непосредственно в творила, т.е. расходуется первым;

- оставшееся количество извести списывать в виде гидратной извести.

Вывод: с использованием полученных результатов ООО «Автозаводская ТЭЦ» внедрена методика по определению количества реагентов, находящихся в ячейках мокрого хранения извести и коагулянта с относительной погрешностью менее 5 %.

Литература

1. СТО 70238424.27.100.027-2009. «Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования».

2. Кострикин Ю.М. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления (Справочник). Энергоатомиздат. Москва. 1990.

3. ГОСТ 9179-77. «Известь строительная. Технические условия».

УДК 621.321

Е.Н. БУШУЕВ, д.т.н., доцент,
Н.В. БУШУЕВА, ст. преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Расчёт необходимой дозы реагента для нейтрализации сточных вод водоподготовки, основанный на преобразованном уравнении электронейтральности

Аннотация. Предложена математическая модель и методика расчёта, позволяющие определить необходимую дозу корректирующего реагента (кислоты или щёлочи) для нейтрализации сточных вод после регенерации Н-ОН-ионитных фильтров при водоподготовке на ТЭС и АЭС.

Ключевые слова: ТЭС, водоподготовка, математическая модель, технологический расчёт, доза нейтрализующего реагента.

E.N. BUSHUEV, Doctor of Engineering, professor,
N.V. BUSHUEVA, senior lecturer

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Calculation of the required dose of a reagent for the neutralization of wastewater from water treatment, based on the transformed equation of electrical neutrality

Abstract. A mathematical model and calculation method are proposed to determine the required dose of a corrective agent (acid or alkali) for neutralizing wastewater after regeneration of H-OH-ion-exchange filters during water treatment at thermal power plants and nuclear power plants.

Key words: TPP, water treatment, mathematical model, technological calculation, dose of neutralizing agent.

При проведении технологического расчёта ВПУ на ТЭС и АЭС необходимо определять показатели качества воды при различных видах обработки. Наличие в технологических водах слабых электролитов значительно усложняет проведение таких расчётов. При их выполнении традиционно используют следующие основные подходы: упрощенный расчёт (без учёта смещения химического равновесия) и расчёт через концентрационные изменения [1]. Последний подход характеризуется сложностью решения вычислительной задачи.

Для расчётов показателей качества воды по стадиям обработки удобно использовать математическую модель, основанную на преобразованном уравнении электронейтральности [2, 3]:

$$C_{H^+, \text{вых}} - \frac{K_b}{C_{H^+, \text{вых}} f_1^2} - \left(C_{H^+, \text{вых}} + \frac{2K_{II}}{f_{II}} \right) \frac{K_I \Sigma C_{H_2CO_3}}{C_{H^+, \text{вых}}^2 f_1^2 + K_I C_{H^+, \text{вых}} + \frac{K_I \cdot K_{II}}{f_{II}}} = \Delta C. \quad (1)$$

где $C_{H^+, \text{вых}}$ – равновесная концентрация катионов водорода в воде после обработки, моль/л; K_b – ионное произведение воды; K_I , K_{II} – константы диссоциации углекислоты по первой и второй ступени; f_1 , f_{II} – коэффициенты активности одновалентных и двухвалентных ионов; $\Sigma C_{H_2CO_3}$ – суммарная молярная концентрация форм диссоциации угольной кислоты в обрабатываемой (исходной) воде, моль/л,

$$\Sigma C_{H_2CO_3} = C_{H_2CO_3, \text{исх}} + C_{HCO_3^-, \text{исх}} + C_{CO_3^{2-}, \text{исх}};$$

ΔC – постоянная ионного баланса, зависящая от концентраций ионов сильных электролитов в обработанной воде:

$$\Delta C = C_{\text{ЭК}}(SO_4^{2-})_{\text{ВЫХ}} + C_{\text{ЭК}}(Cl^-)_{\text{ВЫХ}} + C_{\text{ЭК}}(NO_3^-)_{\text{ВЫХ}} - C_{\text{ЭК}}(Ca^{2+})_{\text{ВЫХ}} - C_{\text{ЭК}}(Mg^{2+})_{\text{ВЫХ}} - C_{\text{ЭК}}(Na^+)_{\text{ВЫХ}}, \text{ моль(ЭКВ)/л.}$$

Преобразованное уравнение электронейтральности было использовано для расчёта необходимого расхода реагента (H_2SO_4 , $NaOH$, $Ca(OH)_2$) для нейтрализации смешанного кислого и щелочного стока, образующегося после регенерации Н-катионитных и ОН-анионитных фильтров. Подобный расчёт традиционно проводится по количеству ионов H^+ и OH^- содержащихся в этих водах. Однако такой расчёт даёт погрешность, т.к. не учитывает содержание в сточных водах форм диссоциации слабых электролитов.

В состав математической модели кроме (1) входят также следующие зависимости.

Выражение по расчёту показателя рН:

$$pH_{\text{ВЫХ}} = -\lg(C_{H^+, \text{ВЫХ}} \cdot f_1).$$

Значение показателя рН в нейтрализованном стоке должен составлять 6,5–8,5.

Уравнение по нахождению концентрации k-го иона сильного электролита, образующегося при диссоциации нейтрализующего реагента в обработанной воде:

$$C_{\text{ЭК}}(k)_{\text{ВЫХ}} = C_{\text{ЭК}}(k)_{\text{ИСХ}} + D_{\text{реаг}},$$

где $D_{\text{реаг}}$ – доза нейтрализующего реагента, ммоль(ЭКВ)/л.

Для остальных ионов сильных электролитов балансовое уравнение на стадии нейтрализации имеет вид:

$$C_{\text{ЭК}}(i)_{\text{ВЫХ}} = C_{\text{ЭК}}(i)_{\text{ИСХ}}.$$

После преобразования зависимостей, входящих в математическую модель, можно получить уравнение, позволяющее вычислить необходимую дозу реагента для обеспечения требуемого значения показателя рН в нейтрализованных сточных водах. Для получения более точного результата необходимо производить итерационные уточнения коэффициентов активности. Предложенная математическая модель позволяет

учитывать температуру нейтрализованного стока и определять дозу реагента для обеспечения требуемого диапазона показателя pH.

Расчётная методика была реализована в системе компьютерной алгебры SMath Studio, которая является бесплатной для личного использования и обладает большими вычислительными возможностями.

В качестве примера на рис. 1 представлен график изменения расчётного значения показателя pH в зависимости от дозы кислоты для нейтрализации щелочного стока.

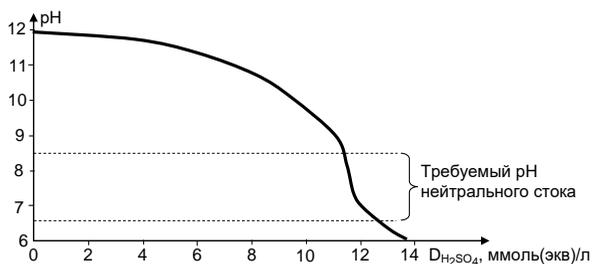


Рис. 1. Зависимость расчётного показателя pH воды от дозы кислоты для нейтрализации щелочного стока (доза, рассчитанная через эквивалентные количества кислоты и щёлочи в стоках составляет 11,59 ммоль(экв)/л, с учётом смещения углекислого равновесия – 12,01 ммоль(экв)/л)

Вывод: таким образом, предложены математическая модель и методика расчёта, позволяющие определить необходимую дозу нейтрализующего реагента (кислоты или щёлочи) для обеспечения требуемых значений показателей pH в нейтральном стоке с учётом смещения химических равновесий диссоциации слабых электролитов.

Литература

1. Бушуев, Е.Н. Основы математического моделирования химико-технологических процессов водоподготовки на ТЭС: учеб. пособие / Е.Н. Бушуев; ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина". Иваново, 2018. –168 с.
2. Бушуев, Е.Н. Исследование и математическое моделирование химико-технологических процессов водоподготовки на ТЭС: дис. д-ра техн. наук: 05.14.14. Иваново, 2010. 359 с.
3. Бушуев, Е.Н. Расчёт необходимой дозы при реагентной обработке воды, основанный на преобразованном уравнении электронейтральности / Е.Н. Бушуев, Н.В. Бушуева // Материалы междунар. научно-технич. конф. "Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии"(XXI Бенардосовские чтения), 2-4 июня / в 3 т.; Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина", –Иваново. –2021. –Т. 2: Теплоэнергетика. –С. 161-164.

УДК 621.321

Е.А. КАРПЫЧЕВ, к.т.н, доцент
Н.Г. ИВАНОВА, к.х.н., доцент
Н.Н. ЯРУНИНА, к.т.н

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: admin@xste.ispu.ru

Снижение концентрации железа в исходной (природной) воде на ТЭС

Аннотация. Более половины тепловых электрических станций (ТЭС) России на текущий момент подошли или перевалили за 50-летний рубеж эксплуатации [1]. Часто в этих условиях возникают проблемы с подготовкой добавочной воды, связанные с высоким содержанием железа как в исходной (природной), так и обработанной (осветленной или умягченной) воде и жесткими требованиями к ее качеству, прежде всего, для установок обратного осмоса [1], а также и для оборотных систем водопользования. Целью данного исследования было повышение эффективности предочистки природных вод с высоким содержанием железоорганических соединений, на примере Череповецкой ГРЭС.

Ключевые слова: тепловые электрические станции, водоподготовка, снижение концентрации железа.

E.A. KARPICHEV, Ph.D., docent,
N.G. IVANOVA, Ph.D., docent
N.N. YARUNINA, Ph.D.

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: admin@xste.ispu.ru

Reduction of iron concentration in the initial (natural) water at the thermal power plant

Annotation. More than half of thermal power plants (TPPs) in Russia have now reached or exceeded the 50-year limit of operation [1]. Often in these conditions there are problems with the preparation of additional water associated with a high iron content in both the source (natural) and treated (clarified or softened) water and strict requirements for its quality, primarily for reverse osmosis plants [1], as well as for circulating water use systems. The purpose of this study was to increase the efficiency of pretreatment of natural waters with a high content of organo-iron compounds, using the example of Cherepovets GRES.

Key words: тепловые электрические станции, водоподготовка, снижение концентрации железа.

Удаление железа из воды, понижение его концентрации до допустимых норм является одной из самых насущных задач водоподготовки. Содержание железа в разных источниках водоснабжения значи-

тельно отличается и по форме соединений железа, и по его концентрации. При содержании общего железа 0,5 мг/л начинается образование рыхлого шлама из хлопьевидных осадков в системах водоснабжения, что носит негативный характер и является дополнительной проблемой по удалению этого осадка. Более высокая степень очистки воды от примесей железа актуальна при дальнейшем использовании такой ступени очистки воды как обратный осмос.

Состав исходной воды реки Суда обессоливающей установки Череповецкой ГРЭС: $\text{Щ}_o = 0,5-4,4$ мг-экв/дм³; $\text{Ж}_o = 0,8-4,6$ мг-экв/дм³; $[\text{Cl}^-] = 1,2-2,8$ мг/дм³; $\text{SiO}_2 = 3,2-10$ мг/дм³; $\text{Oк} = 2,0-60$ мгО/дм³.

Предварительная очистка воды р. Суда (п. Кадуй) осуществляется в двух осветлителях ЦНИИ 1 производительностью 250 м³/ч. Большую часть года, при повышенных значениях жёсткости исходной воды, предварительная очистка ВПУ эксплуатируется в режиме известкования с коагуляцией. Качество известково-коагулированной воды в этом режиме соответствует нормативным требованиям согласно СТО ВТИ 37.002-2005* «Основные требования к применению ионитов на водоподготовительных установках тепловых электростанций. Технологические рекомендации по диагностике их качества и выбору».

В паводковый период осветлители эксплуатируются в режиме коагуляции сульфатом алюминия с дозировкой полиакриламида (ПАА). В таком режиме эксплуатации установки предварительной очистки воды фиксируются превышения значений показателей качества коагулированной воды над рекомендуемыми значениями (табл. 1).

Таблица 1. Показатели качества природной и осветленной воды

Проба воды	Ок, мгО/дм ³	Fe, мг/дм ³	Жесткость, мг-экв/дм ³	Al, мкг/дм ³	Щелочность, мг-экв/дм ³
Режим известкования с коагуляцией					
Исходная	10,1	0,84	3,8	-	2,26
Известково-коагулированная	2,8	0,33	2,0	-	0,45
Режим коагуляции (паводок)					
Исходная	38,4	1,1	2,0	58	1,7
Коагулированная	7,16	0,13	2,0	523	0,51

С целью повышения эффективности предочистки в условиях Череповецкой ГРЭС проведены лабораторные исследования коагуляции воды с использованием наиболее дешёвого коагулянта, сульфата алюминия и новых альтернативных полиакриламиду флокулянтов производства компании SNF (Франция). В пределах дозировки сульфата алюминия 0,44–1,64 мг-экв/л, было определены эффективные значения pH и дозы коагулянта. С уменьшением значений pH₂₅ эффективность удаления железо-органических соединений из воды увеличивается.

Приемлемый результат визуально и по показаниям качества проб воды удалось получить при $pH_{25}=5,8\div 6,0$.

С увеличением дозы коагулянта при постоянном значении pH_{25} эффективность удаления органических соединений увеличивается (табл. 2).

Таблица 2. Показатели качества коагулированной воды

Пробы	1	2	3	4	5	6	7	Исходная вода
pH_{25}	5,9	5,9	5,8	5,9	5,9	5,9	6,0	7,5
Доза коагулянта, мг-экв/дм ³	0,44	0,64	0,84	1,04	1,24	1,44	1,64	0
Доза кислоты, мг-экв/дм ³	1,2	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0	0
[Al], мкг/дм ³	425	427	430	432	427	426	429	58
Ок, мгО ₂ /дм ³	31	29	25	15	9	6	7	38

Оптимальное сочетание дозы кислоты и дозы коагулянта, исходя из результатов анализов, удалось получить в пробе под №6.

Подбор импортного флокулянта в сравнении с ПАА проводился в 3-й серии опытов при следующих условиях: дозы коагулянта – 1,44 мг-экв/дм³, кислоты – 0,2 мг-экв/дм³. Наиболее эффективные результаты получены при коагуляции с флокулянтом FA 920 PWG (молекулярность $6 \cdot 10^6$ а.е.м с катионовой направленностью заряда) (табл. 3).

Таблица 3. Показатели качества коагулированной воды в 3-ей серии опытов

Пробы	1	2	3	4	5	Исходная вода
Доза флокулянта, мг/дм ³	0,1	0,2	0,3	0,4	-	
pH_{25}	6,2	6,2	6,2	6,2	6,3	7,5
[Al], мкг/дм ³	250	174	166	186	462	58
Ок, мгО ₂ /дм ³	8	6	6	6	6	38

Анализ полученных результатов (табл. 3) показывает, что наиболее эффективна по показаниям анализов проба под №3 (при дозе флокулянта 0,3 мг/дм³). Однако по экономическим соображениям можно рекомендовать флокулянт марки FA 920 PWG с дозой флокулянта 0,2 мг/дм³. Таким образом, отработана методика «пробной коагуляции», позволяющая найти наиболее эффективные дозировки коагулянта и флокулянта, в частности в условиях качества исходной воды Череповецкой ГРЭС.

Литература

1. Ларин, Б.М. Проблемы реализации ионообменных и мембранных технологий обработки воды в энергетике / Ларин Б.М., Юрчевский Е.Б // Теплоэнергетика, 2019. – №10. – С. 66-73.

УДК 621.321

А.Б. ЛАРИН, д.т.н., профессор
А.А. ЗИДИХАНОВА, соискатель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru

Водно-химический режим паровых барабанных котлов на основе реагента «ВТИАМИН»

Аннотация. Современные условия эксплуатации паровых котлов ТЭЦ и энерготехнологических котлов промышленных предприятий характеризуются частыми отклонениями от проектных режимов как по качеству добавочной и питательной воды, так и по технологическим режимам, в частности, в результате длительных простоев в резерве. Традиционный водно-химический режим (ВХР) в этих условиях не обеспечивает нормативных показателей качества воды и пара, что заставляет использовать альтернативные ВХР, в частности, на основе аминоксодержащих реагентов (АСР). С этой целью могут использоваться импортные и отечественные комплексные реагенты. Представлены результаты исследований в промышленных условиях отечественных реагентов марки «ВТИАМИН». Исследования проведены на паровых котлах среднего и высокого давления в рамках опытно-промышленных испытаний с целью модернизации ВХР для решения конкретных задач эксплуатации оборудования.

Ключевые слова: паровые котлы, водно-химический режим, аминоксодержащие реагенты, опытно-промышленные испытания.

A.B. LARIN, doctor of technical sciences, professor
A.A. ZIDIKHANOVA, applicant

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru

Water-chemical regime of steam drum boilers based on the reagent "VTIAMIN"

Annotation. Modern operating conditions of CHP steam boilers and power technology boilers of industrial enterprises are characterized by frequent deviations from the design modes both in terms of the quality of additional and feed water, and in technological modes, in particular, as a result of long downtime in reserve. The traditional water-chemical regime (VCR) in these conditions does not provide normative indicators of water and steam quality, which forces the use of alternative VCR, in particular, based on amino-containing reagents (ASR). For this purpose, imported and domestic complex reagents can be used. The results of research in industrial conditions of domestic reagents of the brand "VTIAMIN" are presented. The research was carried out on medium- and high-pressure steam boilers as part of pilot tests in order to modernize the VCR to solve specific problems of equipment operation.

Key words: steam boilers, water-chemical regime, amino-containing reagents, pilot tests.

Результаты опытно-промышленных испытаний реагента «ВТИАМИН» на барабанных энергетических котлах ($p_6=13,8$ МПа)

Опытно-промышленные испытания (ОПИ) были проведены на котле БКЗ-420-140 НГМ ТЭЦ, где был модернизирован ВХР с дозировкой аммиака, элиминокса (соединения гидразина) и фосфатов, путем добавления к ним небольших количеств реагента «ВТИАМИН КР-31» [2] для постепенного создания защитной пленки на внутренних поверхностях и обеспечения режима консервации на срок не менее 6 месяцев без дополнительных химико-технологических мероприятий.

ОПИ комплексной технологии ведения совмещенного аммиачно-элиминоксо-полиаминного водно-химического режима (КТ АЭП) производились в соответствии с утвержденной программой и состояли из следующих этапов:

1. Контрольный этап, в ходе которого поддерживался существующий на ТЭЦ традиционный тип водно-химического режима с дозированием раствора аммиака, элиминокса и тринатрийфосфата.

2. Опытный этап – использование существующего ВХР с одновременным дозированием реагента ВТИАМИН КР-31 в барабан котлоагрегата ПК-2. Данный этап включал исследование возможности отказа от фосфатирования котловой воды.

Каждый из этапов завершался проведением контрольных вырезов образцов экранных труб для оценки качественного и количественного состава отложений.

В течение всего опытного этапа такие показатели ВХР, как pH, электропроводимость, содержание ионов натрия, кремния, аммиака находились в стабильных нормируемых значениях.

Во время дозирования реагента «ВТИАМИН КР-31» в котловую воду ПК-2 проводился постоянный контроль за его избытком по всему конденсатно-питательному тракту. При этом в котловой воде чистого и солевого отсеков концентрация реагента находилась практически постоянно на достаточном уровне для формирования защитной пленки (не менее 10 мкг/дм³). В перегретом паре, конденсате паровой турбины избыток реагента присутствовал периодически, в предельно малых количествах и только на начальном этапе дозирования. Период появления реагента в паре и конденсате соответствует по времени его максимальному содержанию в котловой воде (до 200÷220 мкг/дм³).

С целью подведения промежуточных результатов проведения ОПИ 15.11.2021 специалистами ООО «Водные технологии-инжиниринг» совместно с эксплуатационным персоналом произвели визуальный осмотр барабана ПК-2. Отмечено наличие защитной пленки с высшей степенью коррозионной стойкости и удельной сорбцией (0,5 мкг/см²), соответствующей требованию РД 34.20.596-97 [1] – не менее

0,3 мкг/см², а также отмечено отсутствие на рассматриваемых поверхностях следов коррозионных процессов.

Из проведенного исследования можно заключить, что:

1. В результате проведения ОПИ КТ АЭП с применением реагента «ВТИАМИН КР-31» на котлоагрегате ПК-2 данной ТЭЦ, его экранные поверхности показали во всех тестах высокую степень защиты от коррозии.

2. КТ АЭП позволяет отказаться от проведения мероприятий по консервации и расконсервации оборудования (с применением аммиака и элиминокса).

3. Для повышения эффективности КТ АЭП необходимо использовать дозировки реагента «ВТИАМИН КР-31» как в котловую, так и в питательную воду для полноценной защиты не только экранной системы котла, но также экономайзеров и питательных трубопроводов.

Литература

1. РД 34.20.596-97 Методические указания по консервации тепломеханического оборудования с применением пленкообразующих аминов.

2. Суслов, С.Ю. Реагенты на основе аминов для ведения ВХР / С.Ю. Суслов, А.В. Кирилина, И.А. Сергеев [и др.] // Теплоэнергетика. – 2017. – № 3. – С. 92-96.

УДК 621.321

А.Б. ЛАРИН, д.т.н., профессор
А.А. ЗИДИХАНОВА, соискатель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru

Водно-химический режим энергоблоков ПГУ на основе аминоксодержащих реагентов

Аннотация. В последнее десятилетие широкое применение на электростанциях России и Западной Европы получил водный режим паровых котлов и котлов-утилизаторов парогазовых установок (ПГУ) на основе дозирования в водный теплоноситель полиаминов. Комплексные реагенты торговых марок «Helamin», «Setamin» стали вытеснять традиционный гидразино-аммиачный водный режим. Однако, высокая стоимость и неопределенность компонентного состава импортных реагентов подвели к созданию и исследованию отечественных аналогов. Одним из таких стали комплексные реагенты марки «ВТИАМИН», в частности «ВТИАМИН КР-33». Здесь представлены некоторые результаты опытно-промышленных испытаний реагента «ВТИАМИН КР-33» на котлах-утилизаторах блоков ПГУ при разных тепловых схемах, в рамках решения задачи импортозамещения полиаминной технологии водно-химического режима.

Ключевые слова: котлы-утилизаторы ПГУ, водно-химический режим с полиаминами, исследование и опытно-промышленные испытания.

A.B. LARIN, doctor of technical sciences, professor
A.A. ZIDIKHANOVA, applicant

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru

Water-chemical regime of ccgt power units based on amino-containing reagents

Annotation. In the last decade, the water regime of steam boilers and waste boilers of combined-cycle gas plants (CCGT) based on the dosing of polyamines into an aqueous coolant has been widely used at power plants in Russia and Western Europe. Complex reagents of the brands "Helamin", "Cetamin" began to displace the traditional hydrazine-ammonia water regime. However, the high cost and uncertainty of the component composition of imported reagents led to the creation and research of domestic analogues. One of these was the complex reagents of the brand "VTIAMIN", in particular "VTIAMIN KR-33". Here are some results of experimental and industrial tests of the reagent "VTIAMIN KR-33" on waste boilers of CCGT units under different thermal schemes, as part of solving the problem of import substitution of polyamine technology of the water-chemical regime.

Key words: CCGT recovery boilers, water-chemical regime with polyamines, research and pilot tests.

Большое распространение получили двухконтурные тепловые схемы блоков ПГУ с последовательным питанием водой контура низкого давления (КНД) и контура высоко давления (КВД). Деаэрация воды в схемах ПГУ с последовательным питанием осуществляется в деаэрационной колонке, установленной на барабаны низкого давления (БНД). Такое решение упрощает тепловую схему, но усложняет регулирование расхода «выпара» деаэратора. При снижении расхода выпара ухудшается эффект деаэрации, прежде всего, по удалению из воды углекислоты в форме CO_2 , что приводит к выносу углекислоты в пар уже из барабана контура высокого давления (БВД). В этом случае ухудшается качество пара и, часто выходит за нормативный предел показатель «удельная электропроводность Н-катионированной пробы» (χ_n).

Исследования ВХР на блоках одной ТЭС ПГУ-110МВт (ст.№1-4) с последовательным питанием КНД–КВД выполнялись с октября 2019 по май 2022 года с целью замены импортного реагента «Helamin» на отечественный – «ВТИАМИН КР-33». Этот реагент открывает целочку комплексных реагентов, разрабатываемых ООО «Водные технологии-инжиниринг» (г. Москва), для обработки питательной и котловой воды с целью предотвращения образования накипи и защиты от коррозии поверхностей нагрева [1]. Как и импортные реагенты марки «Helamin», «ВТИАМИН КР-33» содержит в составе такие индивидуальные амины, как моноэтаноламин, морфолин, циклогексанамин с малыми добавками других аминоксодержащих веществ. Концентрации индивидуальных

веществ соответствуют требованиям СанПин 2.1.4.1074-01 (в редакции от 02.04.2018) и подбираются с учетом характеристик конкретного теплоэнергетического оборудования.

Для контроля за процессом стабилизации показателей водно-химического режима выполнялся штатный оперативный контроль. Анализ результатов аналитического контроля при дозировании реагента ВТИАМИН КР-33 показывает, что наблюдался процесс стабилизации содержания меди в конденсате и питательной воде (точка отбора ДЭК БНД) на всех энергоблоках. Получены стабильные значения по величине рН в пределах от 9,3 до 9,5 по конденсатно-питательному тракту и котловой воде низкого и высокого давлений, величина рН в перегретом паре также поддерживается на уровне не более 9,4. Помимо величины рН также стабильно низкие значения по содержанию железа по тракту, так, например, содержание железа в котловой воде контура высокого давления при штатной работе на энергоблоках находится в пределах от 3 до 23 мкг/дм³.

Показатель электропроводности Н-катионированной пробы на энергоблоках ст. № 1 и 2 постепенно стабилизировался. В конденсате за КЭН энергоблока № 1 величина электропроводности Н-катионированной пробы составляла, в среднем, 0,63 мкСм/см, среднее значение в насыщенном паре КВД составляло 0,57 мкСм/см, а в перегретом паре КВД среднее значение 0,72 мкСм/см, что превышает нормативное значение 0,5 мкСм/см.

Таким образом, данные оперативного химконтроля, в целом, согласуются с данными ОПИ от 27.05.22 по 31.05.22. Причиной устойчивого превышения нормы удельной электропроводности Н-катионированной пробы перегретого пара определяется наличием уголекислоты, как следствие недостаточной декарбонизации основного конденсата в деаэрационной колонке БНД.

Литература

1. Кирилина А.В. Применение реагента ВТИАМИН КР-33 для ведения водно-химического режима на ТЭС/ А.В. Кирилина, С.Ю. Суслов, В.В. Козловский, Е.Ф. Нарта // Матер. V науч.-практ. конф. «Теоретические и практические вопросы применения приборов контроля ВХР в энергетике». – г. Н. Новгород, ООО «ВЗОР», 2019. С. 85-87.

УДК 621.321

Е.Г. УХАЛОВА, ассистент
Ю.П. НИКИТИНА, магистр
Н.А. РЯБОВА, инженер

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: lena.uxalova@mail.ru

Метод диагностики состояния водно-химического режима (ВХР) паровых барабанных котлов с применением искусственного интеллекта

Аннотация. Водно-химический режим призван обеспечивать эксплуатацию теплоэнергетического оборудования без отложений (накипи) и коррозии. Нарушения ВХР могут привести (и приводят) к аварийным ситуациям разной степени глубины. Скорость нарастания нарушения ВХР, а следовательно, развития аварийной ситуации, на паровом котле, в ряде случаев может быть достаточно высокой. Проведенные исследования показали, что автоматический химконтроль основных потоков теплоносителя энергоблока (в более широком определении – химико-технологический мониторинг) необходим для контроля и поддержания норм ВХР в соответствии с НТД (нормативно-техническая документация), особенно в переходных режимах эксплуатации котла предотвращения быстро развивающихся процессов нарушений ВХР, при определенных условиях принимающих «цепной» характер.

Ключевые слова: паровые котлы, водно-химический режим, химический контроль, искусственный интеллект.

E.G. UKHALOVA, assistant
Yu.P. NIKITINA, master's degree
N.A. RYABOVA, engineer

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: lena.uxalova@mail.ru

The method of diagnosis of the condition water-chemical regime (VCR) of steam drum boilers using artificial intelligence

Annotation. The water-chemical regime is designed to ensure the operation of thermal power equipment without deposits (scale) and corrosion. Violations of the VCR can (and do) lead to emergency situations of varying degrees of depth. The rate of increase in the violation of the VCR, and consequently, the development of an emergency situation, on a steam boiler, in some cases can be quite high. The conducted studies have shown that automatic chemical control of the main coolant flows of the power unit (in a broader definition – chemical and technological monitoring) is necessary to control and maintain the norms of the VCR in accordance with the NTD (regulatory and technical documentation), especially in the transitional modes of operation of the boiler to prevent rapidly developing processes of violations of the VCR, under certain conditions taking a "chain" character.

Key words: steam boilers, water-chemical regime, chemical control, artificial intelligence.

Ухудшение качества пара, вырабатываемого котлоагрегатами чревато снижением эффективности, потребляющего пароборудования, вплоть до его аварийных остановов.

В данной работе представлены результаты использования алгоритма расчетного определения концентраций ионных примесей для охлажденных проб острого пара энергетических котлов с давлением как менее 10 МПа, так и для котлов СВД и СКД, а также промышленных котлов утилизаторов, включая блоки ПГУ.

При этом, для пара высокой чистоты с удельной электропроводностью Н-катионированной пробы (χ_{H}) не более $0,5 \pm 1,0$ мкСм/см и значениях рН выше 8,0 достаточно измерений χ и χ_{H} с расчетом рН, содержания и концентраций катионов в расчете на $[\text{Na}^+]^{\text{усп}}$, концентраций анионов сильных кислот в расчете на $[\text{Cl}^-]^{\text{усп}}$. Для пара с повышенными содержанием и концентрацией углекислоты при $\chi_{\text{H}} > 1,0$ мкСм/см в диапазоне рН от 6,0 до 9,5 необходимы измерения χ , χ_{H} и рН охлажденной до $25 \pm 10^\circ\text{C}$ пробы пара с расчетом содержания, концентраций натрия, углекислоты. Во всех случаях рассчитывается концентрация аммиака, присутствующего в пробе или другого щелочного агента, например, этаноламина, а в случае их совместного использования - в пересчете на аммиак.

Пример 1. Измерения системы автоматического химического контроля (АХК) качества пара барабанного котла и лабораторные анализы Петрозаводской ТЭЦ дали, следующие результаты (приведенные к 25°C): $\chi = 4,1$ мкСм/см; $\chi_{\text{H}} = 0,144$ мкСм/см; рН = 9,15; $[\text{NH}_3] = 495$ мкг/дм³.

Расчет по приведенной методике с параметром дал следующие результаты: $[\text{Cl}^-] = 0,23$ мкмоль/дм³; $[\text{HCO}_3^-] = 0,20$ мкмоль/дм³; $[\text{OH}^-] = 15,08$ мкмоль/дм³; рН^{расч} = 9,18; $[\text{NH}_4^+] = 15,513$ мкмоль/дм³; $[\text{NH}_3]^{\text{расч}} = 475$ мкг/дм³; СС = 13,5 мкг/дм³.

Сравнение рассчитанного значения рН с измеренным аналогом отличается на 0,03 ед. рН, что укладывается в паспортную погрешность рН-метра, равную $\pm 0,05$ ед. рН и вполне приемлемо. Расчетное значение концентрации аммиака отличается от измеренного значения на 4%, что также приемлемо для условий оперативного химконтроля.

Пример 2. Измеренные значения χ , χ_{H} , рН охлажденной пробы перегретого пара котла-утилизатора Г-420 БПЭ ($P_{\text{пара}} = 3,9$ МПа) составили: $\chi = 5,23$ мкСм/см; $\chi_{\text{H}} = 2,55$ мкСм/см; рН = 7,0.

Расчет по приведенному алгоритму дает следующие результаты: $[\text{Cl}^-] = 100,65$ мкг/дм³; $[\text{Na}^+] = 65,21$ мкг/дм³; $[\text{NH}_3] = 676,19$ мкг/дм³; $\Sigma\text{CO}_2 = 2,14$ мг/дм³; содержание $\text{CC}_{\text{NaCl}} = 350,1$ мкг/дм³. Сравнивая с нормативными значениями [3], даёт: $[\text{Na}^+] < 260$ мкг/дм³; $\text{CC}_{\text{NaCl}} < 500$ мкг/дм³, т.е. качество пара удовлетворяет нормам и «техническим требованиям» предприятия.

Сравнение результатов расчетов по примерам 1 и 2 показывает, что при близких (не сильно отличающихся) значениях концентраций аммиака в паре котла Е-420-140-565 ($P_6 = 13,8$ МПа) Петрозаводской ТЭЦ (Пример 1) и технологического котла-утилизатора Г-420 БПЭ ($P_6 = 3,9$ МПа) «Фосагро» (Пример 2), значение солесодержания различается в 25 раз ($13,5$ мг/дм³ (Пример 1) и $350,1$ мг/дм³ (Пример 2)). Суммарная концентрация форм углекислоты в примере 1 не превышает 10 мг/дм³, тогда как в примере 2 составляет $2,14$ мг/дм³, т.е. превышает более, чем в 200 раз.

Проведенное исследование показывает возможность косвенного измерения ряда важных показателей качества водного теплоносителя в режиме оперативного химического контроля. Это позволяет обнаружить и своевременно устранить возникшие нарушения водно-химического режима. В настоящее время ведется согласование условий на разработку автоматического анализатора качества пара энергетических котлов с ООО «НПП Техноприбор» (г. Москва), реализующего на базе измерений электропроводности и рН и искусственного интеллекта программу расчетного определения его основных показателей.

Таким образом, реализация искусственного интеллекта посредством программного продукта, обеспечивающего алгоритм расчетного определения ряда основных нормируемых и диагностических показателей качества водного теплоносителя, позволяет оперативно оценивать состояние и причины нарушения водно-химического режима паровых котлов, разделяя влияние отдельных факторов, и принимать правильные решения по устранению нарушений.

Литература

1. Ларин А.Б. Разработка метода химического контроля на основе измерений электропроводности и рН и совершенствование систем обеспечения водно-химического режима на ТЭС: дисс. ... докт. техн. наук / Ларин Андрей Борисович. – Иваново, 2017. – 471 с.

УДК 621.321

А.Б. ЛАРИН¹, д.т.н., профессор
С.В. КИЕТ², к.т.н., зам. ген. директора ООО «НПП ТЕХНОПРОБОР»
Е.Г. УХАЛОВА, ассистент
К.В. ЗОТОВА, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru¹, s.kiet@tehnopribor.ru²

Разработка математической модели растворов электролитов с реализацией в измерении рН

Аннотация. Переход к новым технологиям на ТЭС и АЭС повышает эффективность работы энергоблоков, и ужесточает требования к качеству водного теплоносителя. Непрерывные автоматические измерения в этих условиях доста-

точно надежно обеспечиваются кондуктометрами, а развитие информационных технологий позволяет реализовать расчетные методики определения некоторых показателей качества по измерениям электропроводности.

Ключевые слова: котельные установки, водно-химический режим, питательная вода, расчет значений pH.

A.B. LARIN¹, doctor of technical sciences, professor
S.V. KIET², Ph.D., Deputy gene. director of LLC NPP TECHNOPROBOR,
E.G. UKHALOVA, assistant
K.V. ZOTOVA, postgraduate student

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru¹, s.kiet@tehnopribor.ru²

Development of a mathematical model of electrolyte solutions with implementation in pH measurement

Annotation. The transition to new technologies at thermal power plants and nuclear power plants increases the efficiency of power units, and tightens the requirements for the quality of the water coolant. Continuous automatic measurements in these conditions are reliably provided by conductometers, and the development of information technology allows us to implement computational methods for determining some quality indicators by measurements of electrical conductivity.

Key words: boiler installations, water-chemical regime, feed water, calculation of pH values.

Алгоритм косвенного определения показателей качества воды анализатором «Лидер-АПК»

На кафедре ХХТЭ ИГЭУ совместно с НПП «Техноприбор» (г. Москва) разработан автоматический анализатор примеси конденсата «Лидер – АПК» [1,2]. С участием авторов выполнена модернизация расчетного алгоритма, разработан способ количественного определения pH и других показателей качества конденсата пара и питательной воды и проведены испытания на промышленных объектах. Способ определения pH, концентрации аммиака, хлоридов и натрия (условного), основан на измерениях удельной электропроводности охлажденных проб: прямой (χ) и H-катионированной (χ_H) пробы. Измеренные значения используются в решении системы уравнений математических моделей ионных равновесий питательной воды и конденсата в условиях нормативного качества воды и пара.

Схема реализации способа показана на рис. По измеренным значениям χ и χ_H определяется расчетное значение показателя pH.

Значение величины pH определяется решением системы следующих уравнений ионных равновесий:

- уравнения диссоциации слабых электролитов;
- уравнение электронейтральности для анализируемой воды;
- уравнение электропроводности для анализируемой воды;

- уравнения, описывающие диссоциацию слабых электролитов в Н-фильтрате;
- уравнение электронейтральности для Н-фильтрата;
- уравнение электропроводности для Н-фильтрата;
- балансовое уравнение форм состояния углекислоты.

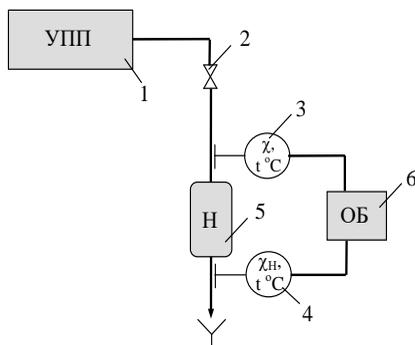


Рис. Схема устройства калибровки рН-метра: 1 - устройство подготовки проб; 2 – кран; 3,4 – датчики кондуктометра; 5 – Н-катионитовая колонка; 6 – обрабатывающий блок

В уравнения входят следующие величины:

- входные данные – показания приборов АХК:

χ , χ_H – соответственно измеряемые удельные электропроводности в анализируемой воде и Н-фильтрате, См/см, приведенные к 25 °С;

- выходные данные – концентрации ионов в анализируемой воде:

$[H^+]$, $[NH_4^+]$, $[HCO_3^-]$, $[CO_3^{2-}]$, $[OH^-]$ – концентрации соответствующих ионов в анализируемой воде, моль/дм³; $[Na^+]_{\text{усл}}$ – суммарная концентрация ионов натрия, кальция и магния в анализируемой пробе в пересчете на ионы натрия, моль/дм³; $[Cl^-]_{\text{усл}}$ – суммарная концентрации анионов хлоридов, сульфатов и нитратов в пересчете на хлориды, моль/дм³; $[H^+]_H$, $[Na^+]_H$, $[HCO_3^-]_H$, $[CO_3^{2-}]_H$, $[OH^-]_H$, $[Cl^-]_H$ – концентрации соответствующих ионов в фильтрате Н-фильтра, моль/дм³;

Решение системы уравнений реализуется на базе измеряемых величин χ , χ_H для случая присутствия аммиака в пробе воды и для случая его отсутствия.

Решение математической модели относительно концентрации ионов водорода $[H^+]$ и показателя $pH = -\lg[H^+]$, в условиях качества питательной воды ($pH > 8$) позволяет получить расчетное выражение в следующем виде:

$$pH = 8 + \lg(3,68 \cdot \chi - 1,2 \cdot \chi_H - 1,9 \cdot \chi_H^2).$$

В табл. представлены результаты измерений и расчета рН водных растворов как с дозировкой аммиака (поз. 1-3), так и без неё (поз. 4-7). Апробация способа выполнена для питательной воды энергоблоков с прямоточными котлами СКД и паровых барабанных котлов.

Таблица. Результаты измерений и расчётов контролируемых показателей качества воды в условиях лабораторного стенда

№ пробы	Измерения				Расчёт	
	X, мкСм/см	X _н , мкСм/см	рН	[NH ₃], мкг/дм ³	рН	[NH ₃], мкг/дм ³
1	8,04	0,19	9,47	1400	9,47	1397
2	5,42	0,90	9,2	700	9,24	744
3	2,85	0,90	9,0	318	8,90	300
4	0,28	0,27	7,8	отс.	7,87	отс.
5	0,27	0,152	7,9	отс.	7,93	отс.
6	0,164	0,204	6,8	отс.	6,77	отс.
7	0,142	0,189	6,52	отс.	6,58	отс.

Принятый подход отвечает требованиям СТО ВТИ-2009 и зарубежных нормативных документов может использоваться для оперативного автоматического химконтроля качества питательной воды и пара барабанных и прямоточных энергетических котлов.

Литература

1. Патент на изобретение РФ №2573453. МПК G 01 N 21 27, G 01 N 33 18. Способ определения рН малобуферных предельно разбавленных растворов типа конденсата / Ларин Б.М., Ларин А.Б., Сорокина (Иванова) А.Я., Киет С.В.; заявл. 14.08.2014.; опубл. 20.01.2016. Бюл. № 2.

2. Ларин Б.М. Совершенствование химического контроля водно-химического режима ТЭС на основе измерений электрической проводимости и рН / Ларин Б.М., Ларин А.Б. // Теплоэнергетика, 2016. - №5. - С.70-74.

УДК 502.34

Н.А. ЕРЕМИНА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: zavkaf@xxte.ispu.ru

Анализ изменений экологического законодательства, проблематичные вопросы

Аннотация. рассмотрены изменения экологического законодательства в области установления нормативов допустимых выбросов в атмосферу.

Ключевые слова: норматив допустимого выброса, предельно допустимый выброс, объект негативного воздействия на окружающую среду.

N.A. EREMINA, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: zavkaf@xxte.ispu.ru

Analysis of changes in environmental legislation, problematic issues

Abstract. Reviewed changes in environmental legislation in the field of setting standards for permissible emissions into the atmosphere.

Key words: allowable emission standard, maximum allowable emission, object of negative environmental impact.

Изменения экологических нормативно-правовых актов (НПА) происходят довольно часто, что создает дополнительные трудности в работе экологических служб и отделов промышленных предприятий.

Так, например, Федеральный Закон (ФЗ) №7 «Об охране окружающей среды» [1] только в 2022 году претерпел 5 редакций, всего же за 20 лет действия этого закона, он редактировался 56 раз. ФЗ №89 «Об отходах производства и потребления» [2] за 24 года изменялся 47 раз, в том числе в 2022 году было 5 редакций, ФЗ №174 «Об экологической экспертизе» [3] за 27 лет изменялся 50 раз, ФЗ №96 «Об охране атмосферного воздуха» [4] за 23 года – 18 раз, ФЗ №74 «Водный кодекс РФ» [5] за 16 лет – 51 раз, в т.ч. 6 раз только за 2021 год.

Изменения в Федеральном законодательстве всегда влекут за собой изменения или разработку новых нормативно-правовых актов следующего уровня – положений, перечней, правил, стандартов, методик и т.п., проследить все эти изменения достаточно сложно, т.к. в большинстве случаев предыдущий акт просто отменяется.

Рассмотрим изменения на примере нормирования допустимого воздействия. До сих пор в разных нормативных документах можно встретить различные формулировки норматива допустимого воздействия на атмосферный воздух, так, например, в ФЗ №7 это «Норматив допустимого выброса» (НДВ), в ФЗ № 96 – «Предельно допустимый выброс» (ПДВ), в Приказе Минприроды России от 11.08.2020 N 581 [6] эти две формулировки представлены как взаимозаменяемые: «Настоящая методика определяет порядок разработки (расчета) и установления нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (далее – предельно допустимые выбросы, выбросы соответственно)...».

После вступления в силу ФЗ №219 [7] система нормирования и контроля стала ориентированной не на конкретное предприятие-природопользователя, а на объекты, оказывающие негативное воздействие (ОНВ), которые в свою очередь разделили на 4 категории. Теперь рассчитывать и устанавливать НДВ обязаны только ОНВ I, II и III категории при проведении оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС), а сам расчет НДВ является приложением к проектной или разрешительной документации (табл. 1).

Таблица 1. Правила расчета и установления НДС

Категория ОНВ	Для каких веществ необходим расчет	В состав какой документации входит расчет
Действующие, строящиеся или проектируемые объекты I категории	Высокотоксичные вещества, вещества с канцерогенными и мутагенными свойствами (I и II класс опасности в соответствии с гигиеническими нормативами по СанПиН 1.2.3685-21)	Для проектируемых объектов – по материалам ОВОС. Для действующих объектов – Комплексное экологическое разрешение (КЭР) (до утверждения КЭР – утвержденный проект НДС)
Действующие, строящиеся или проектируемые объекты II категории	Загрязняющие вещества по перечню, в отношении которого применяют меры госрегулирования (распоряжение Правительства РФ от 08.07.2015 N 1316-р)	Для проектируемых объектов – по материалам ОВОС. Для действующих объектов - Декларация о воздействии на окружающую среду (проект НДС утверждает руководитель организации) КЭР (при наличии)
Действующие, строящиеся или проектируемые объекты III категории	Высокотоксичные вещества, вещества с канцерогенными и мутагенными свойствами (I и II класс опасности в соответствии с гигиеническими нормативами по СанПиН 1.2.3685-21)	Проект НДС утверждает руководитель организации
ОНВ IV категории	Не требуется разработка НДС (ПДВ)	

Алгоритм разработки и установления НДС для действующих ОНВ начинается с процедуры инвентаризации выбросов, а именно с формирования данных для разработки НДС, определения перечня загрязняющих веществ и стационарных и передвижных источников выбросов. Для строящихся, проектируемых ОНВ нормативы выбросов разрабатываются на основе проектной документации. Особо следует отметить, что НДС определяются при таком режиме работы оборудования, в котором выбросы будут максимальны.

Следующим этапом является расчет рассеивания выбросов в соответствии с Приказом Минприроды №273 от 06.06.2017 [8], анализ результатов, и только затем устанавливаются нормативы выбросов, обязательным является расчет выбросов для соблюдения НДС при наступлении неблагоприятных метеорологических условий (НМУ).

Главным условием разработки НДС является соблюдение гигиенических (экологических) нормативов качества атмосферного воздуха (величин ПДК) за границей санитарно-защитной зоны (СЗЗ) объекта.

До 2018 года для расчета НДС использовался нормативный документ ОНД-86, в котором приводились расчетные зависимости величины ПДВ (г/с) от вида источника выброса (точечный, линейный, др.), от величины ПДК и фоновой концентрации загрязняющего вещества, высоты дымовой

трубы, географических координат района расположения объекта, температуры и расхода дымовых газов, условий выхода газов из устья дымовой трубы и др.

С 1 июля 2021 года нормативы допустимых выбросов определяются по [6] в виде следующих показателей:

- максимальные разовые значения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (г/с), отражающие наибольшую мощность выбросов этих веществ (массу выбросов загрязняющих веществ в единицу времени) - в отношении загрязняющих веществ, для которых установлены максимальные разовые ПДК в атмосферном воздухе;

- усредненные значения выбросов загрязняющих веществ за год (г/с) с учетом времени работы стационарных источников в течение года и нестационарности выбросов за этот период (год) - в отношении загрязняющих веществ, для которых установлены значения среднесуточных и (или) среднегодовых ПДК в атмосферном воздухе;

- значения валовых (годовых) выбросов загрязняющих веществ (т/год), отражающие суммарную массу выбросов конкретного загрязняющего вещества за год с учетом времени работы оборудования, сезонности нагрузки, расхода топлива, сырья и материалов в течение года.

Таким образом, в настоящее время, определив максимальный выброс загрязняющего вещества для каждого стационарного источника на объекте негативного воздействия, при котором по результатам расчета рассеивания на границе и за пределами СЗЗ не происходит ухудшения качества атмосферного воздуха, т.е. $C_{звн}/ПДК_i \leq 1$, можно это значение установить как НДВ.

Литература

1. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 14.07.2022) – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/
2. Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 N 89-ФЗ (ред. от 19.12.2022) – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/
3. Федеральный закон «Об экологической экспертизе» от 23.11.1995 N 174-ФЗ (ред. от 14.07.2022). Режим доступа – http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8515/
4. Федеральный закон «Об охране атмосферного воздуха» от 04.05.1999 N 96-ФЗ (последняя редакция) – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22971/
5. «Водный кодекс Российской Федерации» от 03.06.2006 N 74-ФЗ (ред. от 01.05.2022) – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/
6. Приказ Минприроды России от 11.08.2020 N 581 «Об утверждении методики разработки (расчета) и установления нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух» (Зарегистрировано в Минюсте России 30.12.2020 N 61944) – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_373018/
7. Федеральный закон от 21.07.2014 № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» (ред. 26.03.2022) – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/420208818>

8. Приказ Минприроды России от 06.06.2017 N 273 "Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе" (Зарегистрировано в Минюсте России 10.08.2017 N 47734) – Режим доступа http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_222765/

УДК 621.3.019.3

Е.В. ЗАЙЦЕВА, к.т.н., доцент,
С.Е. СОЛОВЬЕВА, инженер
Ю.В. ТАГУНОВА, студент,
Э.В. САРАЕВА, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
E-mail: yekoz@mail.ru, yulia.tagunova@yandex.ru

О возможности применения топливных пеллет на энергетических котлах

Аннотация. В работе приведен анализ топливных пеллет различного происхождения и сравнение их с каменными и бурыми углями. Рассмотрена возможность применения топливных пеллет как альтернатива твердому топливу при использовании на энергетических котлах.

Ключевые слова: топливные гранулы, пеллеты, биогранулы, каменный уголь, бурый уголь.

E.V. ZAITSEVA, Ph. D., docent,
S.E. SOLOVEVA, eng.,
YU.V. TAGUNOVA, Stud.,
E.V. SARAIEVA, Stud.

Ivanovo State Power University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya, 34.
E-mail: yekoz@mail.ru, yulia.tagunova@yandex.ru

About the possibility of using fuel pellets on power boilers

Annotation. The paper considers the calorific value of different types of fuels, justifies the option of replacing non-renewable energy sources with renewable ones by processing wood waste production and shows the results of experimental measurements.

Key words: fuel pellets, pellets, biogranules.

В настоящее время все больший интерес вызывает энергетика, работающая на возобновляемых энергетических ресурсах. Это связано и с истощением природных ресурсов и с ухудшением экологической обстановки. Но наряду с этим потребление электрической энергии не сокращается, а постоянно растет. Поэтому встает вопрос о выработке электрической и тепловой энергии при использовании альтернативных топлив. Одним из таких решений является применение топливных пел-

лет, изготовленных из отходов лесоперерабатывающей промышленности для энергетических котлов.

Пеллеты – это спрессованные гранулы, используемые в виде топлива для сжигания в котлах с целью выработки тепловой и электрической энергии.

Производство древесных топливных гранул для российских лесопромышленников остаётся одним из перспективных направлений. Различные виды кородревесных отходов, такие как опил, кора, щепа, стружка, а также отходы от лесозаготовки (пни, ветки, бракованная древесина) являются топливом для котельных и ТЭЦ. Хорошим стимулом для создания новых биотопливных производств и наращивания мощностей действующих заводов является достаточное количество дешёвого сырья. Всё то, что раньше отправлялось на свалки или сжигалось, сегодня представляется ценным материалом для производства востребованной продукции. Основным сырьем по производству пеллет являются древесные отходы и некачественная древесина. Кроме того, пеллеты также изготавливаются из торфа и из агроотходов (лузга подсолнечника, солома, куриный помет, отходы крупяных культур или кукурузы).

Для оценки возможности применения топливных пеллет для энергетических котлов был проведен сравнительный анализ качества твердого топлива и топливных пеллет изготовленных из различного вида сырья. В таб.1 приведены сравнительные характеристики высококачественных и промышленных биогранул.

Таблица 1. Сравнительные характеристики высококачественных и промышленных биогранул

Показатель	Гранулы первого класса	Промышленные гранулы
Диаметр, мм	6-8	8-12
Теплотворность, МДж/кг	16,9	15,1
Теплотворность, кВт/час	4,7	4,2
Содержание золы, %	0-1,5	1,5-5
Плотность, кг/м ³	600	500

Пеллеты легко транспортировать, а топливное оборудование легко подключить, т.к. нет привязки к близости прохождения магистральных трубопроводов, как при подключении к газовым сетям.

Анализ проводился в лаборатории ИГЭУ им. Ленина на кафедре ХХТЭ. В ходе работы сравнивались навески топливных пеллет, топливного брикета и древесных опилок с бурым и каменным углем.

Был проведен ряд экспериментов по определению общей влажности (ГОСТ 32975.2-2014 (EN 14774-2:2009) для биотоплива и ГОСТ Р 52911-2013 для каменного и бурого углей), аналитической влажности (для биотоплива использовали ГОСТ 32975.3-2014 (EN 14774-3:2009), а для углей - ГОСТ 11014-2001) и зольности (ГОСТ 32988-2014

(EN 14775:2009) применялся для биотоплив, ГОСТ Р 55661-2013 (ИСО 1171:2010) – для углей).

Результаты экспериментов приведены в табл.2.

Таблица 2. Результаты определения влажности, зольности и теплоты сгорания топливных пеллет, изготовленных из различного сырья и каменного угля

Исследуемый образец	W ^a , %	A _d , %	Q _n ^p , ккал/кг
Пеллеты	2,932	2,897	3919
Топливный брикет	2,562	0,718	3932,4
Опилочная стружка	3,304	0,308	—
Каменный уголь	4,3	6,021	8464,5
Бурый уголь	11,839	4,013	7079,4

Из таблицы видно, что влажность пеллет и зольность ниже, чем у каменного и бурого угля, следовательно, физический недожог будет ниже и КПД энергоустановки будет выше. Также при сжигании пеллет ниже экологический ущерб, наносимый окружающей среде.

Таким образом, пеллеты - экономически выгодный вариант предотвращения истощения энергетических ресурсов и не являются источником загрязнения окружающей среды.

Литература

1. Справочник химика-энергетика. Под общ. ред. С 74С. М. Гурвича. В 3-х т. Т. 3. И. И. Матвеева. Энергетическое топливо (характеристика и контроль качества). М., Энергия, 1972. 216 с. с ил.

2. <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-povysheniya-energoemkosti-korodrevesnyh-othodov-s-uchetom-zavisimosti-teploty-sgoraniya-ot-vlazhnosti/viewer>

УДК

Л.Н. ХРИПКОВА, к.х.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
Г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: Iveco.67@mail.ru

Определение концентрации никеля методом осадочной хроматографии на бумаге

Аннотация. Статья посвящена изучению возможности хроматографического метода анализа для определения качественного и количественного содержания ионов никеля в сточных водах.

Ключевые слова. никель, хроматография, осадитель, диметилглиоксим.

L.N. KHRIPKOVA, Ph.D., Associate Professor

Ivanovo State Power University
G. Ivanovo, st. Rabfakovskaya, 34
E-mail: Ivec0.67@mail.ru

Determination of the nickel concentration by the method of sedimentary chromatography on paper

Annotation. The article is devoted to the study of the possibility of a chromatographic method of analysis for determining the qualitative and quantitative content of nickel ions in wastewater.

Key words. Nickel, chromatography, precipitant, dimethylglyoxime.

В работе был исследован метод определения концентрации никеля в сточных водах посредством хроматографии. Хроматография в настоящее время является наиболее широко используемым методом исследования объектов окружающей среды. Хроматографический метод был предложен в 1903 году русским ученым М.С. Цветом. Работы М.С. Цвета послужили фундаментом для развития остальных видов хроматографии для разделения как окрашенных, так и неокрашенных соединений, осуществляемых в любых средах.

Присутствие никеля в природных водах обусловлено составом пород, через которые проходит вода: он обнаруживается в местах месторождений сульфидных медно-никелевых руд и железоникелевых руд. В воду попадает из почв и из растительных и животных организмов при их распаде. Соединения никеля в водные объекты поступают также со сточными водами цехов никелирования, заводов синтетического каучука, никелевых обогатительных фабрик. В поверхностных водах соединения никеля находятся в растворенном, взвешенном и коллоидном состоянии, количественное соотношение между которыми зависит от состава воды, температуры и значений pH. Растворенные формы представляют собой главным образом комплексные ионы, наиболее часто с аминокислотами, гуминовыми и фульвокислотами, а также в виде прочного цианидного комплекса. Наиболее распространены в природных водах соединения никеля, в которых он находится в степени окисления +2. Никель принадлежит к числу канцерогенных элементов. Он способен вызывать респираторные заболевания. Считается, что свободные ионы никеля (Ni^{2+}) примерно в 2 раза более токсичны, чем его комплексные соединения. В речных незагрязненных и слабозагрязненных водах концентрация никеля колеблется обычно от 0,8 до 10 мкг/дм³; в загрязненных она составляет несколько десятков микрограммов в 1 дм³. В подземных водах, омывающих никельсодержащие горные породы, концентрация никеля иногда возрастает до 20 мг/дм³.

Хроматография - это метод разделения и анализа смесей веществ, основанный на различном распределении компонентов смеси между

двумя несмешивающимися фазами - одна из которых должна быть подвижной, а другая неподвижной (ПФ, НФ). Смесь внедряется в ПФ при контакте с поверхностью НФ компоненты смеси распределяются между ПФ и НФ в соответствии с их свойствами (адсорбируемостью, растворимостью и др.) Устанавливается динамическое равновесие, вследствие чего молекулы разделяемой смеси часть времени находятся в НФ, а часть - в ПФ. Вдоль хроматографической системы движутся только те молекулы, которые находятся в ПФ.

Данная работа выполнена с целью внедрения в учебный процесс лабораторной работы по определению ионов никеля для студентов 3 курса ИГЭУ направления бакалавриата «Инженерная защита окружающей среды».

Цель лабораторной работы показать, что осадочная хроматография на бумаге позволяет определять содержание неорганических катионов не только качественно, но и количественно. Задачей лабораторной работы является определение количества ионов никеля в исследуемом растворе.

Сущность метода: если фильтровальную бумагу пропитать осадителем, а затем на высушенную бумагу нанести каплю раствора, содержащего ион, образующий с осадителем нерастворимый осадок, то в месте нанесения капли раствора образуется окрашенное или неокрашенное пятно осадка. В случае, если в капле раствора содержится избыток иона, то этот избыток остается на бумаге. При промывании этого пятна чистым растворителем избыточные ионы увлекаются им, переносятся по бумаге и реагируют с новыми порциями растворителя. При этом за движущимся по бумаге растворителем образуется окрашенный или неокрашенный след осадка в виде пика. Наблюдения показывают, что высота пика связана с количеством иона в растворе. Последнее свойство может быть положено в основу количественного определения ионов в растворе методом осадочной хроматографии на бумаге. С целью получения надежных результатов количественное определение производят путем сравнения высот пиков, полученных для исследуемого раствора, с высотами пиков, полученных для стандартных растворов в тех же условиях. В основе метода лежит реакция Л.А. Чугаева – осаждение никеля диметилглиоксимом в слабощелочном растворе в виде комплексного соединения $Ni(C_4H_7N_2O_2)_2$ по реакции:



Даже при небольших количествах никеля осадок диметилглиоксима никеля быстро коагулирует и легко образует красный осадок.

Для нанесения капель на бумагу мы использовали капиллярные пипетки, при этом капля была откалибрована и объем капли составил 0,01768 мл.

На хроматографическую бумагу, пропитанную диметилглиоксимом, наносят калиброванные капли стандартных растворов сульфата нике-

ля, начиная с меньшей концентрации и раствор неизвестной концентрации так, чтобы расстояние между центрами образовавшихся пятен составляло 1,0-1,5см. Подсушивают.

Опускают хроматографическую бумагу в проявитель (12% раствор глицерина) так, чтобы пятна находились выше уровня проявителя на 2 см. В результате на поверхности носителя (неподвижная фаза) протекает химическая реакция взаимодействия ионов никеля с диметилглиоксимом с образованием красного осадка, сформировавшегося в виде красного пятна. Под действием подвижной фазы проявителя в зависимости от концентрации образовавшегося осадка образуются пики движения, как показано на рис. 1.

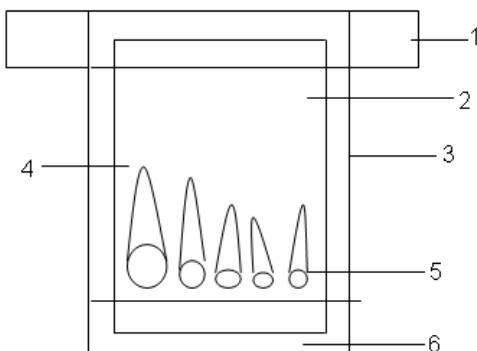


Рис. 1. Принципиальная схема камеры для проявления хроматограммы:
1- крышка камеры (чашка Петри), 2- фронт растворителя, 3-стакан, 4- бумага хроматографическая, 5- пятна, образованные осадками, 6- растворитель (глицерин)

После проявления (30-40 мин) хроматограмму высушивают и измеряют высоты образовавшихся окрашенных пиков.

В табл. 1 представлены результаты эксперимента

Таблица 1. Зависимость концентрации ионов никеля от высоты пика

№ раствора	Концентрация раствора, мг/мл	Сн ·10 ⁻⁷ , моль/л	Высота пиков, h мм
1	0,16	2,8	27
2	0,40	7,0	39
3	0,56	9,9	54
4	0,80	14,2	89
исследуемый	0,70	12,5	74

По полученным данным строят калибровочный график (рис.2).

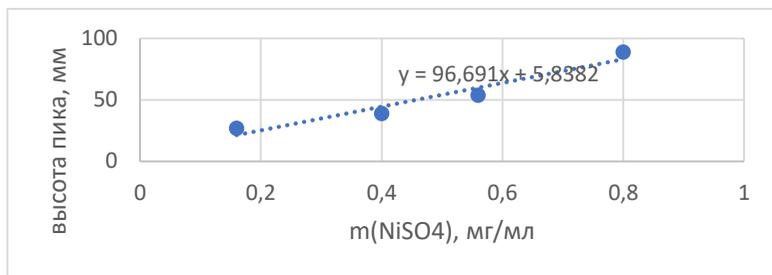


Рис. 2. Зависимость высоты пика от концентрации сульфата никеля

Для определения концентрации исследуемого раствора необходимо на данной хроматограмме нанести каплю исследуемого раствора. По уравнению полученной зависимости определяют искомую концентрацию.

В работе было проведено ряд параллельных опытов для получения статистического набора данных и определения доверительного интервала проводимого эксперимента. В табл. 2 представлены данные по нахождению концентрации исследуемого раствора с неизвестной концентрацией ионов никеля.

Таблица 2. Концентрация раствора никеля неизвестной концентрации

№ опыта	Уравнение	Высота пика неизвестного раствора, мм	Концентрация никеля, мг/мл
1	$Y=96.691x+5.8382$	74	0.70
2	$Y=125x-6$	78	0.67
3	$Y=119.08x-20.526$	67	0.73
4			

Как показывает эксперимент, высота пиков (фронт диметилглиоксимата никеля) подчиняется линейной зависимости вида $y=ax+b$, что делает эксперимент простым в расчете и предсказуемый результат.

Простота выполнения эксперимента дает возможность проведения данной работы в лабораторном практикуме для студентов 3 курса, обучающихся по направлению бакалавриата «Техносферная безопасность».

Литература

1. Валиахметов Д.Р. Хроматографический метод анализа / Д.Р. Валиахметов, Т. Ф. Дехтярь // Наука и инновации в современных условиях : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. - Казань, 2017. - С. 17-19.

Подсекция
«АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»

УДК 620.9, 519.2

В.А. ГОРБУНОВ, д.т.н., доцент
С.С. ТЕПЛЯКОВА, аспирант
Н.А. ЛОНШАКОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
E-mail: gorbynov.w@mail.ru, svetlana20212120@mail.ru

**Анализ влияния эксплуатационных параметров
на работу турбопитательных насосов**

Аннотация. Проведен анализ влияния эксплуатационных параметров на работу турбопитательных насосов на основе разработанной методики оценки влияния эксплуатационных параметров и опытных данных в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: ТЭС, АЭС, кластерный анализ, факторный анализ, турбопитательный насос.

V.A. GORBUNOV, doctor of technical sciences, associate professor
S.S. TEPLYAKOVA, post-graduate student
N.A. LONSHAKOV, candidate of technical sciences, associate professor

Ivanovo State Power University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya 34
E-mail: gorbynov.w@mail.ru, svetlana20212120@mail.ru

**Analysis of the effect of operational parameters
on the operation of the turbine feed pumps**

Abstract. The analysis of the influence of operational parameters on the operation of turbine feed pumps is carried out on the basis of the developed methodology for assessing the influence of operational parameters and experimental data in operating conditions.

Key words: Thermal power plants, nuclear power plants, cluster analysis, factorial analysis, turbine feed pump.

Турбопитательные насосы (ТПН) являются одними из основных потребителей тепловой энергии на собственные нужды ТЭС и АЭС. В настоящее время большое внимание уделяется повышению эффективности эксплуатации турбопитательных насосов. Для этого необходимо провести оценку влияния эксплуатационных параметров. Проблема состоит в том, что необходимо обработать большой массив данных. Решением этой проблемы является применение методики, которая

позволяет выполнить количественную и качественную оценку эксплуатационных параметров [1-3].

Целью данной работы является анализ влияния эксплуатационных параметров на работу турбопитательных насосов на основе разработанной методики оценки влияния эксплуатационных параметров и опытных данных в условиях эксплуатации.

В качестве исходных данных использовались данные 20 термодинамических и гидравлических параметров, регистрируемых во время промышленной эксплуатации оборудования ТПН и уравнения тепловых балансов для нахождения основных показателей эффективности работы ТПН. Для обработки данных используется комплекс многомерных статистических методов: кластерный и факторный анализ в программном пакете Statistica.

Применение факторного анализа сводится к выделению определенного количества основных наиболее значимых факторов на основании критерия «каменистой осыпи» и критерия Кайзера и вычисление матрицы коэффициентов корреляции для всех исходных переменных, которое проводится с помощью метода главных компонент, а также вращение факторов, с целью создания более простой структуры, в которой большое значение факторной нагрузки каждой переменной соответствует только по одному фактору и малое – по остальным факторам.

После проведения интерпретации факторов определяется структура их взаимосвязей с исходными переменными.

Кластерный анализ проводится с помощью метода иерархической (древовидной) кластеризации.

В методе реализуется последовательное объединение в кластер сначала самых близких, а затем и все более отдаленных друг от друга элементов.

Результатом кластеризации является иерархическое дерево. Правилком объединения в кластеры выбран метод одиночной связи, а тип близости между кластерами – Евклидово расстояние.

Подтверждение результатов кластерного анализа с помощью метода иерархической (древовидной) кластеризации проводится методом К-средних.

Целью метода К-средних является классификация объектов в заданное количество кластеров. Метод основан на минимизации суммы квадратов расстояний между каждым элементом исходных данных и центром его кластера. В этом методе задается число кластеров, полученное на основании предыдущего исследования – метода иерархической кластеризации.

В соответствии с проведенным факторным и кластерным анализами определен ряд параметров, существенно влияющих на целевую функцию и эффективность эксплуатации части системы собственных нужд энергоблока – системы турбопитательных насосов.

К ним относится группа параметров:

- 1) Массовый расход питательной воды за питательным насосом ТПН;
- 2) Перепад давления воды на турбопитательном насосе ТПН;
- 3) Массовый расход конденсата приводной турбины ТПН;
- 4) Температура паровоздушной смеси в конденсаторе ТПН;
- 5) Температура конденсата приводной турбины;
- 6) Температура пара на эжекторы ТПН от РОУ 14/6 и деаэраторов.
- 7) Давление пара в конденсаторе ТПН;
- 8) Температура пара перед ГПЗ ТПН;
- 9) Давление пара на эжекторы ТПН от РОУ 14/6 и деаэраторов;
- 10) Температура пара на уплотнения ТПН.

Методами кластерного анализа: иерархической кластеризации и К-средних выявлены внутренние взаимосвязи между эксплуатационными параметрами, влияющими на эффективность работы ТПН.

На основе интерпретации полученных результатов можно сделать вывод о том, что выделенное количество параметров, существенно влияют на эффективность работы системы турбопитательных насосов.

Результаты, полученные для системы турбопитательных насосов, показали отличную верификацию. Поэтому на основе перечня имеющихся параметров, а также с учетом нормативной документации в области энергетического оборудования будут определены три варьируемых параметра, которые будут использованы для повышения эффективности системы турбопитательных насосов.

Результаты, полученные ранее для системы турбопитательных насосов, показали, что методами кластерного и факторного анализа подтверждаются внутренние зависимости эксплуатационных данных и параметры, существенно влияющие на целевую функцию и эффективность эксплуатации части системы собственных нужд энергоблока.

Полученные результаты на основе разработанной методики могут применяться для построения статистической модели с использованием нейросетевых технологий. Данная методика может быть выбрана для оценки работы технологических систем, и подсистем на ТЭС и АЭС.

Литература

1. Электронный учебник по статистике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.statsoft.ru>.
2. Методика оценки влияния эксплуатационных параметров на работу турбопитательного насоса / В. А. Горбунов, С. С. Теплякова, Н. А. Лоншаков [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2022. – № 4. – С. 14-23. – DOI 10.17588/2072-2672.2022.4.014-023.
3. Методика факторного анализа влияния характеристик энергетического оборудования (коэффициента мощности и коэффициента полезного действия) на энергосбережение и энергоэффективность / Д. Е. Давыдянц, В. Е. Жидков, В. С. Ядыкин [и др.] // Kant. – 2013. – № 2(8). – С. 51-57.

УДК 621.321

И.М. ЧУХИН к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: imchukhin@gmail.com

Производство и использование водорода на АЭС

Аннотация. Предложена схема использования водорода на АЭС, позволяющая использовать АЭС в режимах регулирования электрической мощности в электрической сети. Приведен пример оценки ее экономичности по выработке электрической энергии в пиковом режиме.

Ключевые слова: водородная энергетика, атомные электрические станции, пиковые энергетические установки.

I.M. CHUHIN Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: imchukhin@gmail.com

Production and use of hydrogen at nuclear power plants

Abstract. A scheme for the use of hydrogen at nuclear power plants is proposed, which allows the use of nuclear power plants in the modes of regulating electrical power in the electrical network. An example of evaluating its efficiency in generating electric energy in peak mode is given.

Key words: hydrogen energy, nuclear power plants, peak power plants.

Использование водородной энергетики на атомных электрических станциях (АЭС) весьма перспективно [1].

Автор рассматривает возможность производства и использования водорода на АЭС, работающих на влажном насыщенном водяном паре (рис. 1). В предлагаемой схеме АЭС в период провала электрической нагрузки вырабатывает из воды электролизом водород и кислород, а в период пиковых нагрузок, сжигая водород в кислороде, использует высокотемпературный водяной пар для перегрева водяного пара за ЧВД турбины взамен сепаратора-пароперегревателя. В пиковом режиме работы АЭС сепаратор-пароперегреватель отключается.

Анализ тепловой экономичности данной схемы проводился на примере блока К-1000-65/3000. В камере сгорания (КС) сжигается водород в кислороде при температуре горения водорода 2500 °С, а полученный в результате этой реакции высокотемпературный водяной пар, поступает в газопаровой пароперегреватель (ГПП). В ГПП из ЧВД турбины поступает водяной пар, который смешиваясь с высокотемпературным водяным паром из КС, перегревается до такой же температуры, что и в автономном режиме работы АЭС за пароперегревателем (ПП). Сепаратор и пароперегреватель при этом отключены.

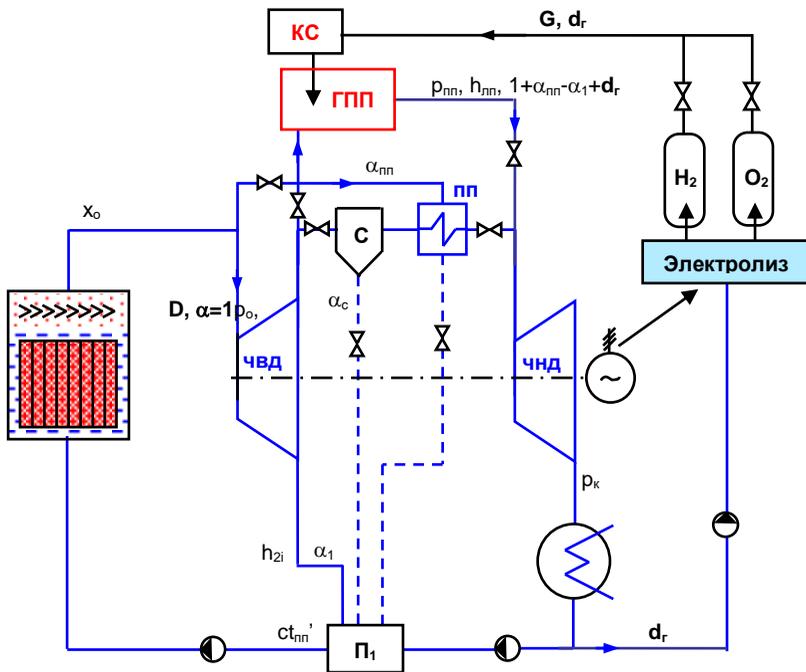


Рис. 1. Схема АЭС на насыщенном водяном паре с электролизным получением водорода и его использованием для получения электро-энергии: КС – камера сгорания, ГПП – газовый пароперегреватель

Расчеты выполнялись в удельных показателях на 1 кг водяного пара поступающего в ЧВД турбины. Доля продуктов сгорания водорода в КС $d_f = G/D$ определяется из расчета ГПП

$$d_f = \frac{(1 + \alpha_{пп} - \alpha_1)(h_{пп} - h_{2i})}{h_{гор} - (1 + \alpha_{пп} - \alpha_1)h_{пп}}$$

В качестве показателей тепловой экономичности такой схемы АЭС, кроме традиционного КПД АЭС $\eta^{АЭС+H_2}$, использовались КПД по выработке пиковой мощности $\eta^{пик}$ и КПД энергоэффективности производства и использования водорода $\eta^{H_2^{эф}}$.

Традиционный КПД рассчитывался по выражению

$$\eta_i^{AЭC+H_2} = \frac{\ell_i^{AЭC+H_2}}{q_1^{AЭC+H_2}} = \frac{(1 + \alpha_{пп})(h_o - h_{2i}) + (1 + \alpha_{пп} - \alpha_1 + d_r)(h_{пп} - h_{ki})}{(1 + \alpha_{пп})(h_o - ct'_{пп}) + d_r(h_{гор} - h_{пп})}$$

Пиковый КПД рассчитывался по выражению

$$\eta_i^{пик} = \frac{\Delta \ell_{Ti}}{q_1^{H_2}} = \frac{\ell_{Ti}^{AЭC+H_2} - \ell_{Ti}}{d_r(h_{гор} - h_{пп})}$$

КПД энергоэффективности производства и использования водорода рассчитывался исходя из того, что элетроэнергия на производство водорода и кислорода вырабатывается на данной АЭС, работающей по традиционной схеме с КПД $\eta_i^{AЭC}$

$$\eta_{H_2}^{эф} = \eta_i^{пик} \eta_i^{AЭC}$$

Основные результаты расчетов данной схема представлены в таблице.

Таблица. **Результаты расчетов установки**

$\alpha_{пп}$	α_c	α_1	d_r	$q_1^{AЭC+H_2}$	$\ell_i^{AЭC+H_2}$	$\Delta \ell_{Ti}$	$\eta_i^{AЭC+H_2}$	$\eta_i^{пик}$	$\eta_{H_2}^{эф}$
				кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	%	%	%
0,12	0,126	0,254	0,078	2857	975,6	183,6	34,15	39,8	13,15

Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие выводы:

- увеличение КПД АЭС с водородом по сравнению с автономной АЭС ($\eta_i=33,04$ %) составляет 3,36 % относительных;
- увеличение пикового КПД АЭС с водородом по сравнению с автономной пиковой ГТУ ($\eta_i^{ГТУ}=33$ %) составляет 20,6 % относительных;
- общая энергоэффективность получения и использования водорода в предложенной установке составляет 13,15 %;
- получение водорода в режимах провала электрической нагрузки и его сжигание в моменты пиковой нагрузки, позволяет перевести АЭС из базового режима работы в режим регулирования электрической нагрузки в сети. При этом возможно дополнительное производство водорода и кислорода на АЭС для продажи потребителям этих ценных продуктов, т.к. как правило, в электросети время пиковых нагрузок меньше времени провалов электрических нагрузок.

Литература

1. https://www.eriras.ru/files/5_ponomarev-st_-prezentatsiyaa_25_10_18-.pdf
УДК 621.039

М.Н. МЕЧТАЕВА¹, аспирант,
П.А. МИНЕЕВ², аспирант,
В.А. ГОРБУНОВ³, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: maria.mechtaeva@mail.ru¹, pasha.mineevr@ya.ru², gorbynov.w@mail.ru³

Исследование взаимного влияния местных сопротивлений на гидравлические характеристики тракта основного конденсата и питательной воды

Аннотация. Рассмотрены аспекты учета взаимного влияния близкорасположенных местных сопротивлений на гидравлические характеристики тракта основного конденсата и питательной воды.

Ключевые слова: гидравлический расчет, гидравлическое сопротивление.

M.N.MECHTAEVA, postgraduate student,
P.A.MINEEV, postgraduate student
V.A.GORBUNOV, doctor of engineering, professor

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: maria.mechtaeva@mail.ru¹, pasha.mineevr@ya.ru², gorbynov.w@mail.ru³

Investigation of the local resistances mutual influence on the flow-resistance characteristics of the condensate and feedwater path

Abstract. Aspects of accounting for the mutual influence of nearby local resistances on the flow-resistance characteristics of the condensate and feedwater path are considered.

Key words: hydraulic calculation, hydraulic resistance.

При расчетах гидравлических систем общую потерю напора обычно находят как арифметическую сумму потерь, вызванных каждым сопротивлением в отдельности. Однако на значение коэффициентов местных сопротивлений большое влияние оказывают условия подхода жидкости к местному сопротивлению, характеризующиеся, в частности, распределением скоростей по сечению [1].

Каждое местное сопротивление нарушает режим течения жидкости в трубопроводе и характерное для прямого трубопровода распределение скоростей. При близком расположении местных сопротивлений они оказывают влияние одно на другое, так как одно из местных сопротивлений, изменяя режим течения, изменяет коэффициент местного сопротивления другого сопротивления.

При расстоянии между местными сопротивлениями меньше, чем

длина влияния, суммарное сопротивление может быть и больше, и меньше, чем сумма соответствующих местных сопротивлений в зависимости от длины прямого участка между ними.

Были проведены исследования взаимного влияния двух местных сопротивлений. Исследовались пары местных сопротивлений, имеющие в конфигурации системы питательной воды блока №3 Калининской АЭС. В качестве исследуемых пар местных сопротивлений были рассмотрены:

- два отвода типа 90-800, соединенные в S-образную конфигурацию (рис.1,а),
- два отвода типа 90-800, соединенные в C-образную конфигурацию (рис.1,д),
- отвод типа 90-800 и сужение 802/704 (рис.1,в),
- сужение 802/704 и отвод типа 90-700 (рис.1,г),
- отвод типа 90-700 и задвижка (рис.1,е),
- тройник со сливанием потоков и задвижка (рис.1,б).

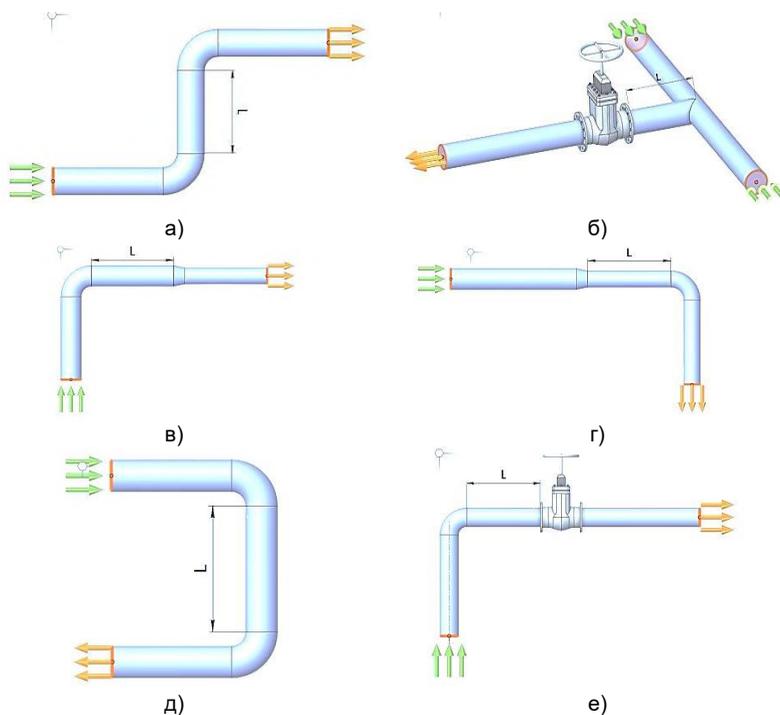


Рис. 1. Визуализация исследуемых конфигураций местных сопротивлений (описание см. в тексте статьи)

Для каждой исследуемой конфигурации были построены и проанализированы поля распределения величин давлений и скоростей питательной воды по сечению потока, а также графики зависимостей величины местного сопротивления от величины расхода среды через трубопровод и расстояния L (мм) между парами местных сопротивлений.

На рис. 2 приведены графики зависимости величины местного сопротивления ξ_m для последовательного соединения отвода типа 90-800 и задвижки с диаметром проходного сечения 800 мм.

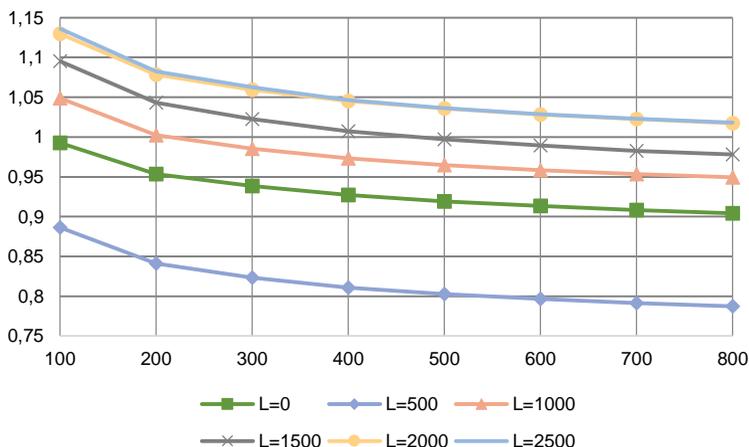


Рис. 2. График зависимости величины местного сопротивления

Анализ рис. 2 показывает, что подобная конфигурация наиболее выгодна при размещении задвижки через 500 мм после отвода.

Таким образом, при оценке гидравлического сопротивления и проектировании трубопроводов систем основного конденсата и питательной воды следует обязательно учитывать взаимное влияние отдельных элементов трубопроводов. Конфигурация трубопроводных систем, в которых на весьма близком расстоянии друг за другом расположены резкие повороты, расширения, сужения и арматура, может значительно изменить общее сопротивление системы и повлиять на снижение затрат энергии собственных нужд на прокачку среды насосами через гидравлическую систему.

Литература

1. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1982. 224 с.

УДК 620.9, 519.2

В.А. ГОРБУНОВ, д.т.н., доцент
С.С. ТЕПЛЯКОВА, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
E-mail: gorbynov.w@mail.ru, svetlana20212120@mail.ru

Перспективы повышения энергетической эффективности работы систем регенеративного подогрева воды

Аннотация. Проведен анализ влияния эксплуатационных параметров на системы высокого давления на основе разработанной методики оценки влияния эксплуатационных параметров и опытных данных в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: ТЭС, АЭС, кластерный анализ, факторный анализ.

V.A. GORBUNOV, doctor of technical sciences, associate professor
S.S. TEPLYAKOVA, post-graduate student

Ivanovo State Power University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya 34
E-mail: gorbynov.w@mail.ru,svetlana20212120@mail.ru

Prospects for improving the energy efficiency of regenerative water heating systems

Abstract. The analysis of the influence of operational parameters on high-pressure systems is carried out on the basis of the developed methodology for assessing the influence of operational parameters and experimental data in operating conditions.

Key words: Thermal power plants, nuclear power plants, cluster analysis, factorial analysis.

Системы регенеративного подогрева воды относятся к системам нормальной эксплуатации, важным для безопасности на ТЭС и АЭС. Системы регенерации имеют структуру, которая включает в себя: подогреватели низкого давления, деаэратор, подогреватели высокого давления и перекачивающие конденсатные и питательные насосы.

С целью повышения экономичности турбоустановки и энергоблока рассматриваются перспективы повышения энергетической эффективности эксплуатации систем регенеративного подогрева воды. В системе энергетического менеджмента [1] АО «Концерн Росэнергоатом» для каждой АЭС сформулированы стратегические цели, направленные на снижение затрат тепловой и электрической энергии, отпускаемой на собственные и хозяйственные нужды станции.

Для увеличения выработки электроэнергии на АЭС проводятся мероприятия по повышению эффективности работы тепломеханического оборудования путем анализа степени влияния эксплуатационных параметров [2], разработки рекомендаций по их регулированию в необходи-

мом диапазоне. Повышение эффективности эксплуатации оборудования подразумевает исследование его работы или модели в различных эксплуатационных ситуациях, которые сопровождаются изменением режимных параметров в широком диапазоне [3].

Цель работы – анализ возможности повышения энергетической эффективности системы регенеративного подогрева АЭС, а именно системы регенерации высокого давления. Объектом анализа являлась система подогревателей высокого давления, которая предназначена для работы в составе турбоустановки мощностью 1000 МВт с турбиной К-1000-60/3000.

Система регенерации высокого давления турбины К-1000-60/3000 выполнена с нагревом воды в двух параллельно включенных по пару и питательной воде и работающих независимо одно от другой группах ПВД типа К-2470-12-2,84 Подольского Машиностроительного завода.

В качестве исходных данных использовались данные 15 термодинамических и гидравлических параметров, регистрируемых во время промышленной эксплуатации оборудования.

В ходе работы выполнен предварительный анализ экспериментальных параметров системы регенерации высокого давления. Проведена оценка степени их влияния на эффективность работы системы на основе разработанной методики [2], включающей в себя комплекс многомерных статистических методов: кластерный и факторный анализ в программном пакете Statistica [4].

В работе планируется разработка математической модели влияния технологических параметров на эффективность эксплуатации на основе нейросетей, т.е. разработка, обучение и верифицирование нейросетевой модели установки [5].

В качестве целевой функции выбраны коэффициент изменения мощности (КИМ) и коэффициент ценности теплоты (КЦТ) [6].

Метод нейросетевого моделирования [5] обладает достаточной точностью для решения поставленных в рамках работы задач, без значительных материальных затрат на его применение. Основным преимуществом применения нейросетевой технологии при обработке информации для оборудования является учет особенностей его эксплуатации с высокой степенью точности.

Результаты, полученные для системы турбопитательных насосов, показали отличную верификацию. Путем исследования были выявлены определен ряд параметров, существенно влияющих на целевую функцию и эффективность эксплуатации системы регенерации высокого давления.

К ним относится группа параметров:

- 1) Давление пара в подогревателе высокого давления;
- 2) Температура пара отбора на подогреватель высокого давления.

Полученные результаты будут применены для выбора параметров, которые будут использованы в качестве регулируемых, а также для

разработки наиболее экономичных режимов его работы, что способствует повышению эффективности эксплуатации энергоблока АЭС и энергосбережению согласно приказу о системе энергетического менеджмента [1].

Литература

1. Приложение к приказу АО «Концерн Росэнергоатом» от 02.04.2020 № 9/01/517-П «Система энергетического менеджмента АО «Концерн Росэнергоатом».
2. Методика оценки влияния эксплуатационных параметров на работу турбопитательного насоса / В. А. Горбунов, С. С. Теплякова, Н. А. Лоншаков [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2022. – № 4. – С. 14-23. – DOI 10.17588/2072-2672.2022.4.014-023.
3. Дунаев, В.А. К вопросу о повышении эффективности и безопасности эксплуатации тепломеханического оборудования АЭС / В.А. Дунаев, Н.А. Лоншаков, В.А. Горбунов // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 2(15). –С. 63–70.
4. Электронный учебник по статистике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.statsoft.ru>.
5. Рубинштейн Я.М., Щепетильников М.И. «Исследование реальных тепловых схем ТЭС и АЭС», М.:– Энергоиздат, 1982. – 272 с.;
5. Горбунов, В.А. Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности теплотехнологических установок / В.А. Горбунов. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2011. – 475 с.
6. Шарапов, В. И. О выборе методов определения удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении / В. И. Шарапов, П. Б. Пазушкин // Труды Академэнерго. – 2007. – № 3. – С. 69-85.

УДК 62-93

В.А. ГОРБУНОВ, д.т.н. профессор,
П.А. МИНЕЕВ¹,
М.Н. МЕЧТАЕВА, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
Email: pasha.mineevr@ya.ru¹

Оценка влияния осушки пара за счет механической и тепловой энергии

Аннотация. В работе представлена оценка различных вариантов промежуточной осушки пара: за счет механической (сепаратор) и тепловой (пароперегреватель) энергии.

Ключевые слова: теплотехника, АЭС, ПТУ, сепаратор, пароперегреватель, влажный пар

V.A. GORBUNOV, Doctor of Engineering,
P.A. MINEEV¹,
M.N. MECHTAEVA, Postgraduate student

Ivanovo State Power University
34, Rabfakovskaya, 153003, Ivanovo
Email: pasha.mineevr@ya.ru¹

Assessment of the effect of steam drying due to mechanical and thermal energy

Abstract. The article presents an assessment of various options for intermediate steam drying. There are mechanical (separator) and thermal (superheater) steam drying.

Key words: thermal power engineering, NPP, STP, separator, steam superheater, wet steam

В качестве рабочего тела на Атомных Электрических Станциях (АЭС), как правило, используется влажный пар. В частности, на блоках, с реакторами типа ВВЭР-1000 параметры пара на выходе из парогенераторов составляют: давление свежего пара – 60 бар, температура пара – 274,3 °С, влажность – 0,5%. В процессе расширения пара в ЦВД турбины типа К-1000-60/1500 влажность пара достигает 12,4%. Поскольку с увеличением влажности пара увеличивается соответствующая составляющая потерь в проточной части турбины, возникает необходимость его осушки. На сегодняшний день существует несколько наиболее распространенных способов осушки пара: механический – в отдельно стоящем сепараторе, который устанавливается на перепускных трубах между цилиндрами, либо в промежуточных сепараторах пара, расположенных по всей проточной части ЦВД турбины; тепловой – в промежуточных пароперегревателях.

Целью исследования является оценка влияния осушки пара за счет механической и тепловой энергии посредством проведения энергетического анализа сепарационной устройства и пароперегревателей блока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 и турбиной К-1000-60/1500. Энергетический анализ произведен для различных вариантов включения элементов (сепаратора и пароперегревателя) в технологическую схему (рис. 1,а):

- 0 Вариант (исходный) – установлены сепаратор и две ступени пароперегревателя;
- 1 Вариант – сепаратор установлен, пароперегреватель отсутствует;
- 2 Вариант – сепаратор отсутствует, пароперегреватель установлен.

В роли показателей, характеризующих энергетическую эффективность элементов используются такие величины, как мощность паротурбинной установки, расход греющего пара, внутренний относительный КПД цилиндров, надежность работы – состояние пара (влаж-

ный/перегретый пар) на входе в цилиндр среднего давления (ЦВД) и на выходе турбины.

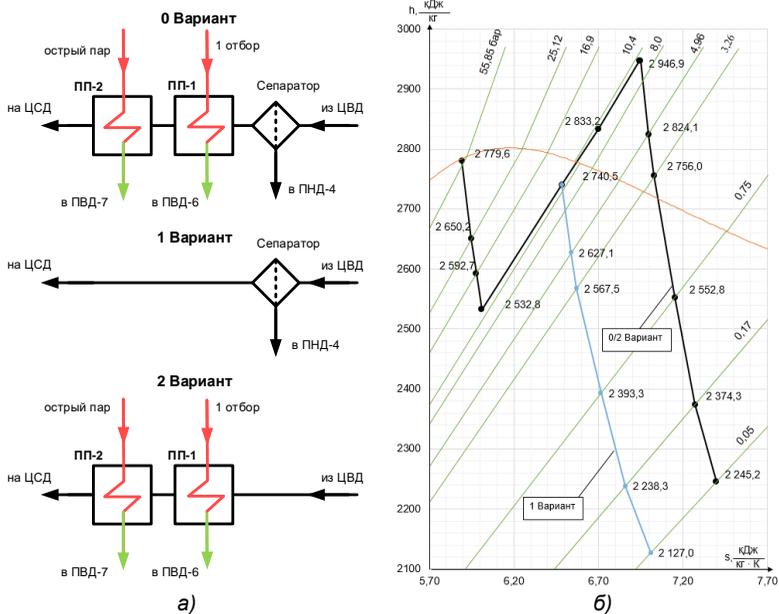


Рис. 1. а – варианты включения сепаратора и пароперегревателя в схему; б – процесс расширения пара в h-s диаграмме для различных вариантов включения сепаратора и пароперегревателя в схему

Для внесения поправок во внутренний относительной КПД турбины в зависимости от различного уровня влажности на входе и выходе из цилиндра используется следующая приближенная формула определения соответствующих потерь [1]:

$$\xi_{\text{вкл}} = a(y_1 + y_2) / 2, \quad (1)$$

где $a = 0,8$ (в первом приближении) – коэффициент, зависящий от конструкции турбинной ступени, ее параметров и условий работы; y_1, y_2 – влажность пара на входе в ступень и выходе из нее.

На рис. 1,б представлен результат расчета процесса расширения пара в турбине для различных вариантов включения сепаратора и пароперегревателя в технологическую схему. Главные отличительные особенности заключаются в следующем: 0 Вариант – пар после ЦВД направляется в сепаратор, где производится его осушка до $x=0,981$, затем перегревается в 2-ух ступенях пароперегревателя и перегретый пар с энтальпией 2946,9 кДж/кг подается в ЦСД; 1 Вариант – влажный пар после

сепаратора, минуя пароперегреватель, направляется в ЦСД; 2 Вариант – пар после ЦВД направляется в 1 ступень пароперегревателя, где происходит его испарения до $x=1$, затем поступает во 2 ступень, где перегревается до параметров, аналогичных 0 Варианту. Основные расчетные характеристики для 0-2 Вариантов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные расчетные характеристики

Показатель	Размерн.	№ Варианта			
		0 Вариант	1 Вариант	2 Вариант	
Мощность ПТУ, N_3	МВт	1070,74	910,4	1105,8	
Расход греющего пара, $D_i (h_i)$	т/ч	238,4 (2650)	0,0	629,8 (2650)	
	(кДж/кг)	312,4 (2780)		465,2 (2780)	
Внутренний относительный КПД ЦСД	%	87	83	87	
Внутренний относительный КПД ЦВД	%	82	77	82	
Состояние пара на входе в ЦСД	p	бар	9,84	10,49	9,84
	t	°С	251,6	182,0 ($y=1,9\%$)	251,6
Состояние пара на выхлопе турбины	p	бар	0,05	0,05	0,05
	t	°С	27,3 ($y=11,4\%$)	27,3 ($y=17,8\%$)	27,3 ($y=11,4\%$)

В ходе анализа табл. 1, становится очевидным, что с точки зрения энергетической эффективности паротурбинной установки (ПТУ) главным показателем является отношения прироста мощности к приросту расхода греющего пара:

$$A = \frac{\Delta N_3}{\Delta \sum D_i} \quad (2)$$

Расчет величины A производится относительно наименьшей мощности 910,4 МВт (1 Вариант) и наименьшего расхода греющего пара 0 т/ч. Таким образом, для 0 Варианта – $A=0,291$, для 2 Варианта – $A=0,178$.

Значения внутреннего относительного КПД цилиндров и состояния пара на входе ЦВД и выхлопе турбины взаимосвязаны, благодаря введению поправки на влажность (1). Выбор именно 0 Варианта для эксплуатации паровой турбины также обусловлен максимально допустимой влажностью для лопаток турбины, которая не должна превышать 12-13% [2, с.511].

Вывод. Как с точки зрения энергетической эффективности ПТУ с турбиной К-1000-60/15000, так и относительно надежной работы турбины, оптимальным является режим работы с одновременной установкой сепаратора и пароперегревателя. Режим без сепаратора и пароперегревателя не рассматривался, поскольку влажность после 1-ой ступени ЦВД превысила бы 13%, что недопустимо по условиям надежной работы. По аналогичной причине, эксплуатация является невозможной при отсутствии пароперегревателя (1 Вариант) – влажность на выхлопе

турбины составляет 17,8%. Режим без сепаратора, но с уставленным пароперегревателем, является допустимым, но менее эффективным в сравнении с исходным вариантом из-за значительно роста расхода греющего пара. Таким образом, методы осушки пара за счет механической и тепловой энергии можно признать в равной степени эффективными и необходимыми в условиях работы АЭС.

Литература

1. Кострыкин В.А., Шелепов И.Г., Шубенко А.Л. Теория тепловых процессов и современные проблемы реновации паротурбинных установок. – Харьков, 2007. – С. 200.
2. Коновалов В.И. Техническая термодинамика / ГОУ ВПО «ИГЭУ им. Ленина». – Иваново: 2005. – С. 620.

УДК 621.165

В.А. ГОРБУНОВ, д.т.н. профессор,
П.А. МИНЕЕВ¹,
М.Н. МЕЧТАЕВА, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфakovская 34
Email: pasha.mineevr@ya.ru¹

К вопросу учета влияния влажности рабочего тела на процессы, протекающие в турбинах

Аннотация. В работе устанавливается способ определения влажности рабочего тела в паротурбинных установках, находящихся в эксплуатации, а также определяется влияние влажности на процессы, протекающие в турбинах.

Ключевые слова: АЭС, ПТУ, влажный пар, внутренний относительный КПД турбинной ступени

V.A. GORBUNOV, Doctor of Engineering,
P.A. MINEEV¹,
M.N. MECHTAEVA, Postgraduate student

Ivanovo State Power University
34, Rabfakovskaya, 153003, Ivanovo
Email: pasha.mineevr@ya.ru¹

On the issue of taking into account the working fluid wetness influence occurring in turbines

Abstract. The article establishes a method for determining the wetness of the working fluid in operational steam turbine, and also determines the effect of wetness on the processes occurring in turbines.

Key words: NPP, STP, wet steam, efficiency ratio of the turbine stage

Основным рабочим телом на турбинах АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000, работающих в блоке с турбинами типа К-1000-60/1500 или К-1000-60/3000, является влажный пар, что обуславливает необходимость, как учета состояния пара (определение влажности), так и влияния этого состояния на реальную работу паровой турбины.

Цель исследования заключается в определении способов оценки влажности в ступенях паровой турбины АЭС, учета влияния влажности на процессы, протекающие в турбине, а также обозначение целей и способов ее контроля.

Когда исследователь сталкивается с любым видом расчета, основанным на эксплуатационных данных рассматриваемой АЭС, то становится ясным, что значения влажности напрямую не измеряется ни в проточной части турбины, ни в регенеративных отборах. Таким образом, возникает вопрос, как определить ее косвенно?

В первом приближении для номинального режима работы блока, влажность за ступенями турбины можно принять по данным, представленным в технической литературе. Однако, эти данные представлены для идеальных условий и не отражают реальный процесс, поскольку одинаковые блоки, находящиеся в эксплуатации даже в рамках одной АЭС, могут иметь несколько различные характеристики. Очевидным выходом является определение влажности пара в ступенях турбины, исходя из влажностей пара в регенеративных отборах. Влажность в регенеративных отборах, в свою очередь, может быть определена из уравнений тепловых балансов соответствующих теплообменников. В случае, когда неизвестными являются несколько параметров, традиционно их можно найти решением систем уравнений тепловых и материальных балансов, а также методом последовательных приближений. В табл. 1 представлены расчетные и паспортные значения влажности пара в соответствующих регенеративных отборах для блока реактора ВВЭР-1000 с турбиной К-1000-60/1500 (прочерками в таблице обозначены отборы, в которые поступает перегретый пар).

Таблица 1. Паспортные и расчетные значения влажности

№ отбора по ходу пара	Паспортное значение влажности, %	Расчетное значение влажности, %
1	7,2	8,1
2	8,9	10,4
3	12,0	12,4
4	-	-
5	0,4	-
6	7,0	6,5
7	10,0	9,9

После определения влажности пара в ступенях турбины, целесообразно определить влияние влажности на КПД ступеней. Влажность

вносит поправки сразу в несколько составляющих потерь – увеличивает их. В общем случае потери от влажности подразделяются на: термодинамические, возникающие в процессе расширения пара с переохлаждением и выпадением капельной влаги, которая имеет отличную от паровой фазы температуру; газодинамические – вследствие неоднородности движения капельной влаги, пленок и паровой фазы; а также прямые потери торможения [1].

Для расчета влияния влажности рабочего тела на относительный КПД ступеней турбин целесообразно было бы определить отдельно составляющие следующие составляющие потерь во влажном и перегретом паре: потери в сопловых лопатках, в рабочих лопатках, с выходной скоростью, от утечек и других составляющих потерь. Однако, в настоящее время, отдельное их определение является достаточно затруднительной задачей, и с достаточной степенью точности можно определить отношение внутренних относительных КПД одной и той же турбины с различными рабочими телами (перегретым паром и влажным паром с различным уровнем влажности) [2]. Тем самым, можно при учете влияния влажности можно будет ввести соответствующие поправки.

Также соответствующие поправки можно ввести путем расчета процесса расширения влажного рабочего тела в турбинах посредством детерминированной модели (рис. 1). В частности, на базе ИГЭУ производится подготовка к такого рода исследованию на примере турбины ГУБТ-25 (модель которой разработана в пакете Ansys CFX[3]), в которой в качестве рабочего тела используется доменный газ с относительной влажностью 100%.

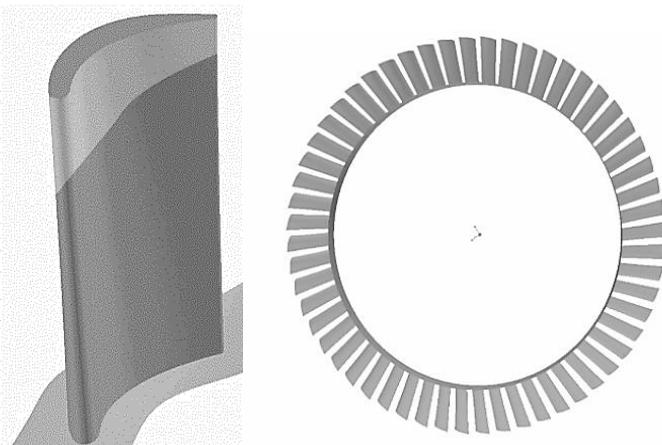


Рис.1. Твёрдотельная модель венца рабочих лопаток первой ступени [3]

Для контроля влажности пара в регенеративных отборах устанавливаются промежуточные сепараторы, а также на перепускных трубопроводах между цилиндрами предусмотрены сепараторы-пароперегреватели (СПП). Так, на блоках с реакторами РБМК-1000, как правило, устанавливаются СПП-500, а на блоках с реакторами ВВЭР-1000 – СПП-1000.

Вывод. Таким образом, в исследовании выявлены основные способы определения влажности на блоках, находящихся в эксплуатации, определен способ оценки внутреннего относительного КПД ступеней турбины, работающих с влажным паром, а также обозначены основные способы контроля влажности в допустимых пределах.

Литература

1. Кириллов, И.И. Основы теории влажнопаровых турбин / И.И. Кириллов, Р.М. Яблоник. - Л.: Машиностроение, 1968. – 264 с.
2. Филиппов Г.А., Грибин В.Г., Тищенко А.А., Лисянский А.С. Влияние влажности на экономичность паровых турбин // «Известия академии наук». - №6. – 2012. – С. 96-107.
3. Нагорная О.Ю., Горбунов В.А., Павлов А.А., Минеев П.А. Разработка модели утилизационной газовой турбины // «Вестник ИГЭУ». – Иваново, 2022. – Выпуск №3. – С. 5-12.

УДК 621.039.51

А.А. БЕЛЯКОВ к.т.н., доцент,
Б.М. ХАРИТОНОВ аспирант,
Т.Д. ТОРОПОВ студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
E-mail: woker-89@mail.ru

Вариант модернизации тепловой схемы с ВВЭР

Аннотация. В работе изучена возможность и целесообразность модернизации тепловой схемы АЭС проекта В-320 путем применения бездеаэрационной тепловой схемы (БТС).

Ключевые слова: тепловая экономичность, деаэрактор, регенеративный подогреватель, поверхностный подогреватель, смешивающий подогреватель, тепловая схема, бездеаэрационная тепловая схема (БТС), АЭС, деаэрация, барботаж, концентрация, стоимость подогревателя

A.A. BELYAKOV, Candidate of Engineering Sciences,
B.M. KHARITONOV, Postgraduate Student,
T.D. TOROPOV, student

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskay street 34
E-mail: woker-89@mail.ru

Variant of modernization of the thermal circuit with WWER

Abstract. This article examines the possibility and expediency of upgrading the thermal scheme of the NPP of the V-320 project by using a non-aerator thermal scheme (NATS).

Key words: thermal efficiency, deaerator, regenerative heater, surface heater, mixing heater, thermal circuit, non-aerator thermal scheme (NATS), NPP, deaeration, bubbling, concentration, heater cost

Целью работы является изучение возможности модернизации тепловой схемы АЭС с ВВЭР путем внедрения бездеаэрационной тепловой схемы (БТС), определение наилучшего состава оборудования БТС, который позволит повысить экономичность турбоустановки и сохранить безопасную эксплуатацию АЭС. Данная работа предполагает разработку БТС для АЭС с РУ В-320, с турбоустановкой К-1000-60/1500-2 ХТГЗ, оценку их тепловой экономичности и экономического эффекта от внедрения такой схемы.

При оценки тепловой экономичности БТС использовался программный комплекс "СХЕМА". Он позволяет рассчитывать переменные режимы с оценкой внутренних относительных КПД, давлений по отсекам, проводить многовариантные исследования и оптимизацию структуры и параметров турбоустановки по критерию тепловой экономичности. Расчет тепловой экономичности показал, что прирост дополнительной мощности и КПД от внедрения БТС на ЭБ АЭС зависит от выбора места слива сепарата, места слива к.г.п. ПВД, комплекта и вида подогревателей низкого давления;

Путем перебора вариантов был сделан выбор в пользу установки дополнительного ПВД, для снижения температуры воды и сохранения условий работы ТПН. Слив к.г.п. осуществляется в смеситель на всас ТПН, а сепарат решено сливать в добавленный в тепловую схему ПВД-1. Получилось, что электрическая мощность и КПД «нетто» возрастают, в сравнении с исходной схемой, на 1,63 МВт и 0,051% соответственно.

Далее были проведены расчеты БТС с установкой одного, двух и трех смешивающих ПНД, одновременно определялось их высотное положение относительно друг друга, выбирались насосы второй и третьей ступени, для определения значения давления перед поверхностными ПНД. Расчеты показали, что с возрастанием количества смешивающих ПНД увеличиваются затраты электроэнергии на СН в связи с установкой конденсатных насосов. Самая экономичная схема получа-

ется при использовании смешивающего ПНД-1, тогда как в остальных случаях (с ПНД-1,2 и ПНД-1,2,3 – смешивающие) мощность и КПД «нетто» начинают снижаться. Однако для дальнейшего рассмотрения была выбрана БТС с двумя смешивающими ПНД, поскольку в ПНД-2 должна быть реализована дегазация конденсата для поддержания требуемой концентрации растворенных газов в конденсатно-питательном тракте. Такая схема увеличивает мощность и КПД «нетто» на 2,05 МВт и 0,064% соответственно.

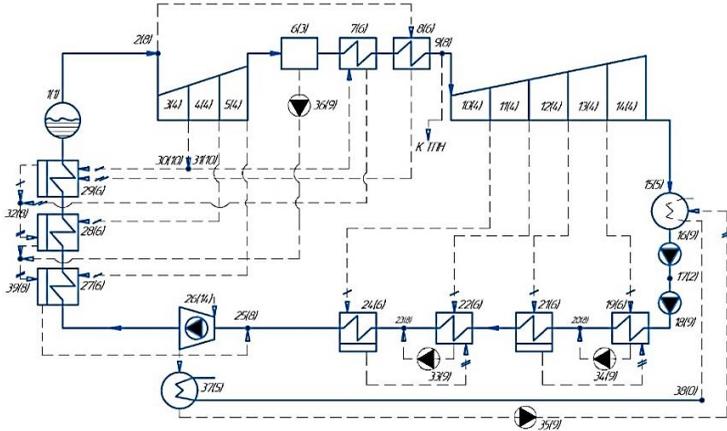


Рис. 1. Тепловая схема К-1000-60/1500-2 без деаэрата. Слив сепарата в ПВД-1

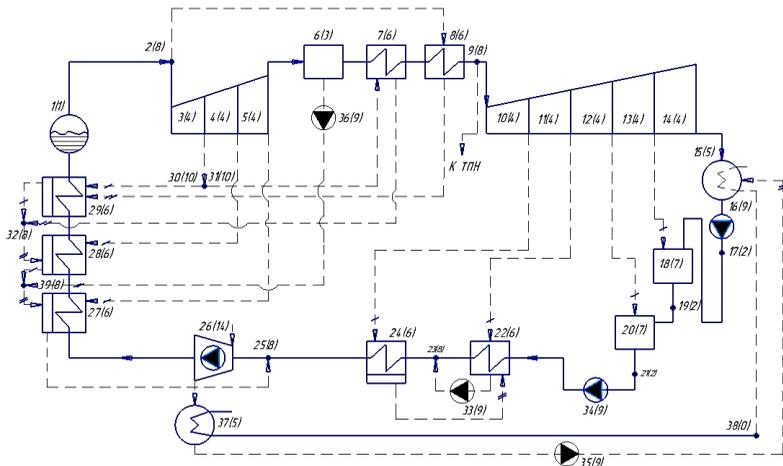


Рис. 2. Тепловая схема К-1000-60/1500-2 без деаэрата. ПНД-1,2 смешивающие

Экономическая эффективность от внедрения БТС заключается в основном в сокращении строительной части машзала на объем деаэрационной этажерки и прочих коммуникаций, предназначенных для деаэратора. Это, теоретически, приводит к уменьшению сроков строительства ЭБ и, следовательно, уменьшает срок сдачи ЭБ АЭС в эксплуатацию. Экономический эффект замены поверхностных ПНД на смешивающие составил 33 803 378,07 [руб], что немного относительно полных затрат в 207 627 043,97 [руб] на реализацию БТС. Рассчитанная себестоимость за 1 кВт·ч равна 86,7 копеек и находится на приемлемом уровне для вновь проектируемых атомных электростанций.

Вывод: таким образом, внедрение БТС в проект современных ЭБ приводит к упрощению исходной схемы с сохранением первоначального уровня надежности. Полученные результаты показывают техническую и экономическую целесообразность применения БТС на АЭС.

Литература

1. Маргулова Т. Х. – Атомные электрические станции: Учебник для высш. – 3-е изд., перераб. и доп.—М.: Высш. школа, 1978. — 360 с. С ил.
2. Ефимочкин Г.И. – Бездеаэрационные схемы паротурбинных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.: ил. – (Б-ка теплоэнергетика).
3. Токов А.Ю., Магницкий Д.Н., Степанов В.Ф. огико-числовое моделирование тепловых схем паротурбинных установок АЭС и ТЭС: методические указания; ГОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина". – Иваново: 2018. – 59 с.

УДК 621.039

М.Н. МЕЧТАЕВА¹, аспирант,
П.А. МИНЕЕВ², аспирант,
В.А. ГОРБУНОВ³, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

E-mail: maria.mechtaeva@mail.ru¹, pasha.mineevr@ya.ru², gorbunov.w@mail.ru³

К вопросу о повышении эффективности вакуумной системы паротурбинной установки

Аннотация. Проведен анализ параметров, влияющих на эффективность вакуумной системы паротурбинной установки, сформулирована методика оценки и критерии эффективности.

Ключевые слова: вакуумная система, конденсатор, эффективность.

M.N.MECHTAEVA, postgraduate student,
P.A.MINEEV, postgraduate student
V.A.GORBUNOV, doctor of engineering, prof.

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

E-mail: maria.mechtaeva@mail.ru¹, pasha.mineev@ya.ru², gorbynov.w@mail.ru³

On the issue of increasing the vacuum system efficiency of a steam turbine plant

Abstract. The analysis of the parameters affecting the efficiency of the vacuum system of the steam turbine plant is carried out, the methodology of evaluation and criteria of efficiency are formulated.

Key words: vacuum system, condenser, efficiency.

Параметры, влияющие на эффективность работы вакуумной системы паротурбинной установки, определяются на основе технико-экономического анализа каждой конкретной ПТУ. Понятие «вакуумная система» затрагивает конденсационную установку, циркуляционные насосы, водоструйные и пароструйные эжекторы, а также конденсатные электронасосы.

В общем случае основным показателем эффективности работы конденсатора является давление пара p_k в его переходном патрубке (горловине), которое в свою очередь зависит от следующих основных параметров:

- температуры охлаждающей воды на входе $t_{1в}$, °С,
- расхода охлаждающей воды через конденсатор $G_в$, т/ч;
- расхода пара в конденсатор D_k , т/ч;
- коэффициента теплопередачи K , Вт/(м²·К),
- площади поверхности теплообмена конденсатора F , м².

Существенное влияние на эффективность работы конденсатора оказывают присосы воздуха, а также эффективность работы воздушных насосов. Необходимо также иметь в виду, что в общем случае на эффективность работы вакуумной системы оказывают влияние паровое сопротивление конденсатора и переохлаждение конденсата.

В основе расчета конденсатора лежат уравнение теплового баланса и уравнение теплопередачи. Уравнение теплового баланса для конденсатора имеет вид

$$Q = D_k \cdot (h_n - h_k) = G_в \cdot C_{рв} \cdot (t_{2в} - t_{1в}), \quad (1)$$

где Q – количество теплоты, передаваемой от пара к охлаждающей воде в единицу времени (тепловая мощность конденсатора),
 h_n, h_k – теплосодержание пара и конденсата соответственно, кДж/кг,
 $C_{рв}$ – теплоемкость воды при постоянном давлении, кДж/(кг·К).

Уравнение теплопередачи для конденсатора имеет вид

$$Q = K \cdot F \cdot \overline{\Delta t}, \quad (2)$$

где $\overline{\Delta t}$ – средняя разность температур между паром и водой [1] для всей поверхности теплообмена конденсатора (среднелогарифмический температурный напор).

Как показано в [2, 3], для любой паровой турбины при постоянном расходе пара в конденсатор D_k и неизменных параметрах свежего пара p_0 , t_0 можно построить зависимость изменения мощности турбины от давления пара в конденсаторе p_k :

$$\Delta N = f(p_k), \quad D_k = \text{const}, \quad t_0 = \text{const}, \quad p_0 = \text{const}. \quad (3)$$

Для экономичной работы турбоустановки необходимо, чтобы прирост мощности турбины при понижении давления пара в конденсаторе и неизменном расходе пара D_k был больше увеличения расхода электроэнергии на привод насосов. Вакуум, соответствующий максимальной выработке полезной мощности турбоустановки при неизменном расходе пара в конденсатор, является наивыгоднейшим и называется экономическим (оптимальным) вакуумом.

Для большинства турбин средних параметров изменение давления в конденсаторе на ± 1 кПа приводит к изменению мощности турбины примерно на 1 %. В то же время у турбин АЭС изменение мощности турбины при изменении давления в конденсаторе на ± 1 кПа приводит к гораздо большему изменению относительной мощности (до 2,0 %), что определяется малым располагаемым теплоперепадом (особенно у турбин насыщенного пара).

Исходя из всего вышеперечисленного, предлагается в качестве критерия эффективности работы вакуумной системы выделить прирост мощности паровой турбины на 1 кг отработавшего пара:

$$\Delta N / D_k, \text{ кВт/кг} / \text{с}. \quad (4)$$

Методика определения и анализа величины данного критерия следующая: необходимо определить экономически обоснованный вакуум в зависимости от фактического давления p_k в конденсаторе и расхода пара D_k на конденсатор, при этом нужно определить величину прироста мощности паровой турбины ΔN при изменении фактического вакуума до величины экономического вакуума, а также величину прироста потребления мощности привода циркуляционных насосов $\Delta N_{\text{цн}}$ в зависимости от изменения расхода циркуляционной воды в конденсатор, разница между этими приростами мощности должна быть максимальной.

Отклонение фактического вакуума от величины экономического вакуума в большую или меньшую сторону свидетельствует о неэффективной работе вакуумной системы или отдельного оборудования, входящего в её состав. Величина экономического вакуума не должна быть меньше критического вакуума в конденсаторе.

Кроме того, в качестве критериев эффективности работы оборудо-

вания вакуумной системы можно выделить термическое сопротивление конденсатора δt и переохлаждение конденсата Δt_k .

Отклонение величины переохлаждения конденсата от нуля в большую или меньшую стороны свидетельствует о неэффективности работы эжекторной группы.

Увеличение термического сопротивления конденсатора относительно номинального значения свидетельствует о неэффективности работы системы циркуляционного водоснабжения.

Исходя из проведенного анализа были сформированы следующие комплексы эксплуатационных параметров, влияющих непосредственно на эффективность работы вакуумной системы паротурбинных установок:

1. Комплекс параметров для определения фактического и экономического вакуума в конденсаторе: фактический расход пара на конденсатор, мощность циркуляционных насосов, давление циркуляционной воды на входе в конденсатор, температура циркуляционной воды на входе и выходе из конденсатора.

2. Комплекс параметров для определения величины переохлаждения конденсата в конденсаторе: температура паровоздушной смеси в конденсаторе, температура конденсата в конденсатосборнике, давление паровоздушной смеси в конденсаторе, уровень в конденсаторе.

На основе данных комплексов будут сформированы и обучены нейросетевые модели, функционирование и взаимодействие которых позволит оценить эффективность работы вакуумных систем.

Литература

2. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел // М.: Энергоиздат – 1981

3. Костюк, А.Г. Паровые и газовые турбины для электростанций: учебник для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; под ред. А.Г. Костюка. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 556 с.

4. Самойлович, Г.С. Переменные и переходные режимы в паровых турбинах / Г.С. Самойлович, Б.М. Трояновский // М. Энергоиздат – 1982

УДК 621.039.51

А.А. БЕЛЯКОВ, к.т.н., доцент,
Б.М. ХАРИТОНОВ, аспирант,
А.В. ШИЛОВА, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
E-mail: woker-89@mail.ru

К вопросу вывода АЭС из эксплуатации

Аннотация. Целью данной работы является ознакомление с конструкцией и опытом эксплуатации комплекса плазменной переработки радиоактивных отходов, а также прогнозная оценка возможности обеспечения его загрузки при реализации проекта вывода из эксплуатации блоков №1 и №2 Нововоронежской АЭС.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, радиация, экология, захоронение, радиационная безопасность, выводу из эксплуатации, отработавшее топливо, высокотемпературная переработка отходов.

A.A. BELYAKOV, Candidate of Engineering Sciences,
B.M. KHARITONOV, Postgraduate Student,
A.V. SHILOVA, student

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskay street 34
E-mail: woker-89@mail.ru

The issue of decommissioning of nuclear power plants

Abstract. The purpose of this work is to familiarize with the design and operational experience of the complex of plasma processing of radioactive waste, as well as a forecast assessment of the possibility of ensuring its loading during the implementation of the decommissioning project of units No. 1 and No. 2 of the Novovoronezh NPP.

Key words: radioactive waste, radiation, ecology, burial, radiation safety, decommissioning, spent fuel, high-temperature waste recycling.

Перспективы развития мировой атомной энергетики во многом определяются проблемой обращения с радиоактивными отходами (РАО), особенно с высокоактивными отходами (ВАО). На сегодняшний день эта задача не решена ни в одной стране мира.

В настоящее время реализуется пилотный проект вывода из эксплуатации блоков №1 и №2 Нововоронежской АЭС (первый в РФ проект вывода из эксплуатации). Как упоминалось ранее, одной из ключевых проблем при выводе из эксплуатации является проблема обращения с образующимися радиоактивными отходами. Для выполнения работ по обращению с РАО на блоках №1 и №2 Нововоронежской АЭС была создана необходимая инфраструктура. При этом основной акцент сделан на использование плазменных технологий переработки.

В 2017 г. на блоке №2 Нововоронежской АЭС был введен в промышленную эксплуатацию комплекс плазменной переработки РАО (далее - КПП РАО), призванный решать проблему переработки твердых РАО, образующихся при выводе из эксплуатации.

КПП РАО предназначен для высокотемпературной переработки твердых радиоактивных отходов смешанного типа низкого и среднего уровня активности, образующихся в процессе вывода из эксплуатации блоков АЭС. Результатом переработки является шлаковый компаунд, пригодный для окончательного захоронения.

Основные функции комплекса:

- прием и временное хранение ТРО;
- переработка ТРО с фиксацией радионуклидов в шлаковом компаунде;

- очистка технологических газов, образующихся в процессе сжигания ТРО.

В основу проектирования КПП РАО, положен плазменный метод прямой переработки радиоактивных отходов, который позволяет получать кондиционированные РАО, пригодные для транспортировки и захоронения или долгосрочного хранения. Примененный метод обеспечивает высокие коэффициенты сокращения объема отходов, снижение объемов образующихся вторичных отходов и получение конечного продукта переработки в виде шлакового компаунда с концентрацией в нем не менее 90% исходных радионуклидов.

Шлаковый компаунд, концентрирующий в себе не только основную часть радиоактивных изотопов, но и тяжелые металлы, и другие опасные химические элементы, представляет собой надежную матрицу, обладающую очень высокой механической прочностью и химической стойкостью к возможным агрессивным воздействиям окружающей среды.

Согласно технико-экономическим обоснованиям в процессе вывода из эксплуатации блоков №1 и №2 Нововоронежской АЭС ожидается образование 24 614,89 м³ РАО, из них:

- 366,14 м³ 2 класса, в том числе 89,54 м³ ВАО и 276,6 м³ САО;
- 5 04,98 м³ 3 класса, в том числе 1 688,4 м³ САО и 4 216,58 м³ НАО;
- 18343,77 м³ 4 класса, в том числе 5225,3 м³ НАО и 13118,47 м³ ОНРАО.

Таким образом, РАО категории ВАО образуется 89,54 м³ (в основном металл ВКУ и корпуса реактора), САО - 1965 м³, НАО - 9441,88 м³, а ОНРАО - 13118,47 м³.

Учитывая, что отходы категории ВАО, а также металлические отходы и отходы, содержащие ПВХ, на КПП РАО не перерабатываются можно оценить количество РАО от вывода из эксплуатации блоков №1 и №2 Нововоронежской АЭС, подлежащих переработке на КПП РАО. Данные представлены в табл. 1.

Таблица 1. Количество и морфологический состав РАО, образующихся при выводе из эксплуатации блоков №1 и №2 Нововоронежской АЭС, м³

	Металл	Фильтры	ПВХ	Бетон, кирпич	Тепло-изоляция, стекло	СИЗ, древесина
САО	643	345	-	727	230	20
НАО	1140,05	415,03	455,8	5680	465,5	1285,5
ОНРАО	450	-	790	7731	1029,47	3118

Принимая во внимание приведенные данные и непригодность переработки отходов категории ВАО, а также металлических отходов и отходов, содержащих ПВХ, мы получаем, что РАО, которые можно переработать, категории САО - 977 м³, НАО - 7430,5 м³, ОНРАО - 11878,47 м³. В итоге, ожидается образование 20285,97 м³ пригодных

для переработки на КПП РАО. На данный момент достигнута производительность КПП в 2500 м³ РАО в год. При такой производительности и морфологическом составе РАО возможна загрузка КПП отходами в течение 5 лет. Критическим видом РАО для загрузки являются сжигаемые отходы в виде спецодежды, ветоши и бумаги. Таким образом без дополнительных отходов переработка РАО на КПП будет приостановлена через 5 лет.

Вывод. В результате выполнения поставленных задач было определено что КПП РАО на отходах, образующихся при выводе из эксплуатации блоков №1 и №2 Нововоронежской АЭС, может эксплуатироваться не более 5 лет. Учитывая проектный срок эксплуатации (30 лет) использование КПП РАО только для нужд переработки РАО от вывода из эксплуатации блоков №1 и №2 Нововоронежской АЭС неэффективно.

Таким образом в ближайшие 5 лет должен быть решен вопрос дозирования КПП РАО эксплуатационными РАО и/или РАО, образующимися в других отраслях науки, промышленности и производства.

Литература

4. Блинова И.В., Соколова И.Д. Состояние работ по выводу АЭС из эксплуатации // Атомная техника за рубежом. 2017. № 5. С. 3–18.
5. Былкин Б.К., Енговатов И.А., Зверков Ю.А. и др. Основы вывода из эксплуатации блоков атомных электрических станций. М.: Издательский дом МЭИ. 2019. 504 с.
6. Палатова С.В. Инновации в области вывода из эксплуатации АЭС // Атомная техника за рубежом. 2018. № 1. С. 3–13.
7. Горлинский Ю.Е., Былкин Б.К., Кутьков В.А., Павленко В.И. Планирование вывода из эксплуатации исследовательских ядерных установок (Учет зарубежного опыта и рекомендаций МАГАТЭ). М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2014. 72 с.
8. Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации блоков атомных станций (НП-012-16). М.: Ростехнадзор, 2016.

УДК 621.311.254

Э.Ю. ЩЕПЕТИЛЬНИКОВ

E-mail: rainyday@mail.ru

Количественная оценка неопределенности (СУСАНИН) моделирования (ДЕКАРТ) истечения вскипающей жидкости. Предварительные результаты

Аннотация. Представлены первые результаты применения одного из инструментов детерминистического метода (СУСАНИН) количественной оценки неопределённости расчетного моделирования кодом ДЕКАРТ эксперимента Эдвардса-О'Брайена по истечению вскипающей жидкости из трубы - оценки накопления ошибки (неопределенности) вычислений во времени вследствие неопределенностей исходных данных модели: НУ, ГУ, источников массы, им-

пульса, энергии (в виде замыкающих соотношений и т.п.). Указаны задачи, решаемые СУСАНИНом в целом, и перспективы его развития и применения.

Ключевые слова: расчетное моделирование, неопределенность, количественная оценка, накопление ошибки

E.Yu. SCHEPETILNIKOV

E-mail: rainyday@mail.ru

Uncertainty quantification (SUSANIN) of flashing water flow computer simulation (DEKART). Preliminary results

Abstract. The article presents the first results of the deterministic method (SUSANIN) for uncertainty quantification applying to calculations of Edwards-O'Brien experiments with flashing water flow. One of the method's tools is the evaluation of error propagation in time due to uncertainties in the model data: ICs and BCs, source terms of mass, momentum, energy etc. Also SUSANIN particular tasks being solved and application prospective are listed.

Key words: computer simulation, uncertainty quantification, error propagation

Количественная оценка и анализ неопределённости (АН) результатов расчетного моделирования физических процессов являются не просто частью научного метода исследования, но и предметно - относительно АЭС - закреплены как законодательное требование в Федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии "Общие положения обеспечения безопасности атомных станций" НП-001-15 [1] (пункт 1.2.9).

В настоящее время АН теплофизических аспектов безопасности проводится практически исключительно на основе вероятностных методов [2], определяющими характеристиками которых являются оперирование моделью объекта как «чёрным ящиком» и большие затраты вычислительных ресурсов для набора статистики.

Существующие средства моделирования теплофизических процессов в ЯЭУ и АН их результатов не отвечают, по мнению автора, современным требованиям, поэтому он приступил к разработке собственных: теплогидравлического кода (ТГК) ДЕКАРТ и СУСАНИНА - инструмента для АН.

Ниже излагаются суть и первые результаты применения одного из инструментов СУСАНИНА в АН, а именно – оценка накопления (изменения) ошибки (неопределённости) результатов («uncertainty/error propagation» [3]) вследствие неопределённости исходных данных расчётной модели: НУ, ГУ и источников массы, импульса и энергии (1); на текущем этапе в качестве меры неопределённости принята сумма слагаемых разложения в ряд Тейлора с частными производными (ЧП) только первого порядка:

$$\begin{aligned}
 \Delta u_i = & \sum_{p=1}^{P_i} \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial IC_p}{\partial u_{n,0}} \Delta u_{n,0} \right) + \sum_{p=1}^{P_i} \sum_{q=1}^{Q_p} \left(\frac{\partial IC_p}{\partial \zeta_q} \Delta \zeta_q \right) + \\
 & + \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial ST_j}{\partial u_{n,0}} \Delta u_{n,0} \right) + \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{l=1}^{L_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial ST_j} \frac{\partial ST_j}{\partial \varepsilon_l} \Delta \varepsilon_l \right) + \\
 & + \sum_{k=1}^{K_i} \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial BC_k}{\partial u_{n,0}} \Delta u_{n,0} \right) + \sum_{k=1}^{K_i} \sum_{m=1}^{M_k} \left(\frac{\partial u_i}{\partial BC_k} \frac{\partial BC_k}{\partial e_m} \Delta e_m \right) + \Delta SM_i
 \end{aligned} \quad (1)$$

где u_i – переменная из искомого вектора решения $U(t)$ системы уравнений (СУ), описывающей поведение моделируемого объекта; Δu_i – погрешность (неопределённость) на шаге t ; $\Delta u_{n,0}$ – погрешность (неопределённость) начального условия (или, с предыдущего шага, $\Delta u_{n,0}(t) = \Delta u_n(t - \Delta t)$); N – количество переменных в векторе $U(t)$; IC – слагаемое начального условия («Initial Condition»); P – количество НУ; Q – число параметров ζ в слагаемом НУ; ST – источниковый член («Source Term»); J – количество источниковых членов; L – число параметров ε в источниковом члене; BC – слагаемое граничного условия («Boundary Condition»); K – количество ГУ; M – число параметров e в слагаемом ГУ; ΔSM – погрешность метода решения СУ («Solution Method»).

Состав (количеств и тип) параметров ζ , ε , e зависит от структуры СУ, а их участие в рассмотрении (принятие неопределённости неравной нулю и расчёт соответствующих ЧП) – от целей проводимого АН.

ЧП в (1) находятся явно, полу- и/или полностью неявно, в зависимости от численной схемы решения СУ. Неопределённости решения на текущем шаге являясь входными переменными для расчёта неопределённостей на следующем.

Из (1) следует, что «общая» текущая погрешность (неопределённость) решения СУ зависит от сочетания множества факторов и может как увеличиваться, так и уменьшаться во времени. Однако, в силу законов сохранения, принятых в модели, она ограничена (с некоторым коэффициентом) подводом-отводом энергии, импульса и массы, т.е. не может увеличиваться бесконечно, а погрешности отдельных переменных решения коррелируют друг с другом как положительно, так и - что важнее для ограниченности общей неопределённости - отрицательно.

Возможности этого подхода демонстрируются на примере расчётного моделирования, ставшего классическим экспериментом Эдвардса-О'Брайена с истечением вскипающей воды из трубы под давлением [4] в «атмосферу».

Нодализационная схема (рис. 1), применённая в расчётах, идентична схеме разработчиков кода RELAP5 [5], их же результаты использованы для сравнения (кросс-верификации) с результатами кода ДЕКАРТ (рис. 2).

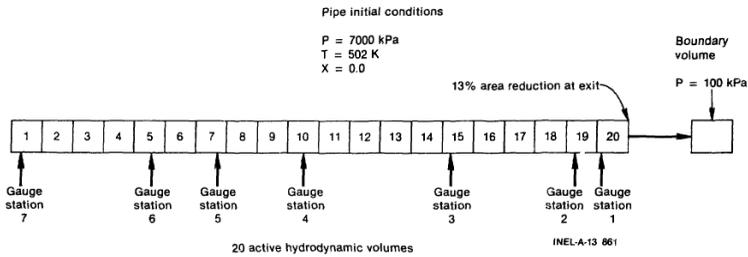


Рис. 1. Расчётная схема эксперимента

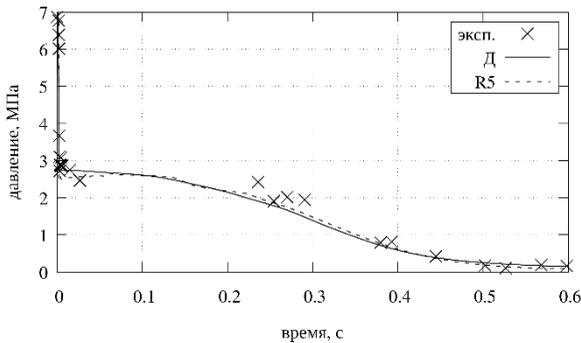


Рис. 2. Изменение давления в позиции датчика GS5 эксп. – экспериментальные данные; Д – результаты ДЕКАРТА; R5 – результаты RELAP5

Мера отличия расчётных данных ДЕКАРТА от экспериментальных по методологии УМАЕ [6] варьируется в пределах $AA_p=0.192\div 0.304$, что соответствует удовлетворительному качеству моделирования.

На рис.3 и 4 представлены результаты расчёта относительного влияния неопределённостей входных параметров: $\Delta T_{\text{воды}} \leq +2\text{K}$ (из анализа экспериментальных данных), $\Delta \xi_{\text{трения}} = +10\%$ (из «анализа» микромодели); $\Delta \zeta_{\text{диафрагмы}} = +50\%$ (из «анализа» микромодели); $\Delta CSA_{\text{диафрагмы}} = +3\%$ (из анализа экспериментальных данных).

На рис.5 и 6 соответственно представлены «коридоры» выходных неопределённостей расчётных давлений при указанных выше входных данных.

Как видно, на текущем этапе разработки пары ДЕКАРТ/СУСАНИН расчётный коридор неопределённости перекрывает экспериментальные данные не на всём протяжении эксперимента, что указывает на «слабые» места модели ТК в отношении двухфазного потока. Это обстоятельство было очевидно и до начала разработки ДЕКАРТА. Конечным и абсолютным критерием проверки АН является так называемое «слепое» расчётное моделирование, когда результаты эксперимента неизвестны априори.

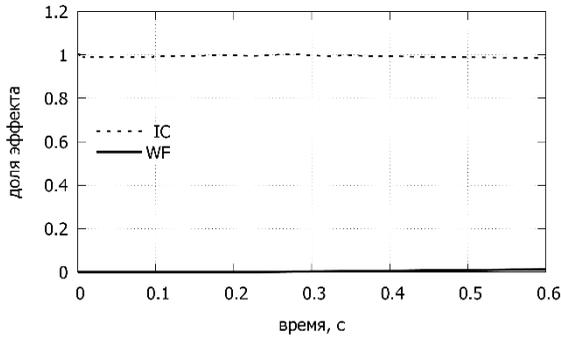


Рис. 3. Влияние неопределённостей на расчёт давления (датчик GS5)
IC – начальные условия; WF – трение о стенку

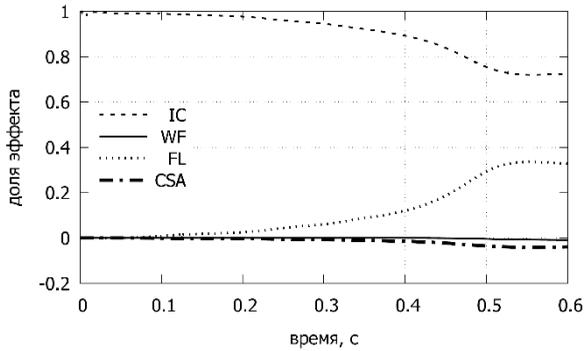


Рис. 4. Влияние неопределённостей на расчёт давления (датчик GS1)
IC – начальные условия; WF – трение о стенку; FL – потери на диафрагме;
CSA – проходное сечение диафрагмы

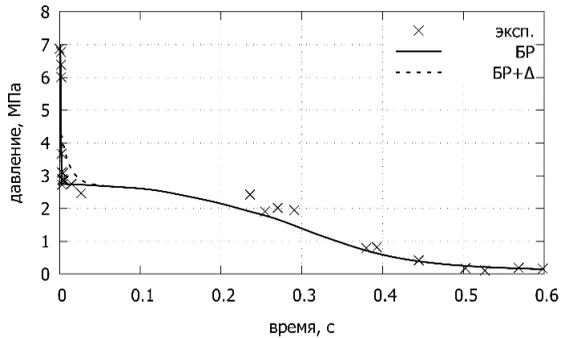


Рис. 5. Коридор неопределённости расчёта давления (датчик GS5)
эсп. – экспериментальные данные; БР – базовый расчёт;
БР+ Δ - верхняя граница коридора неопределённости

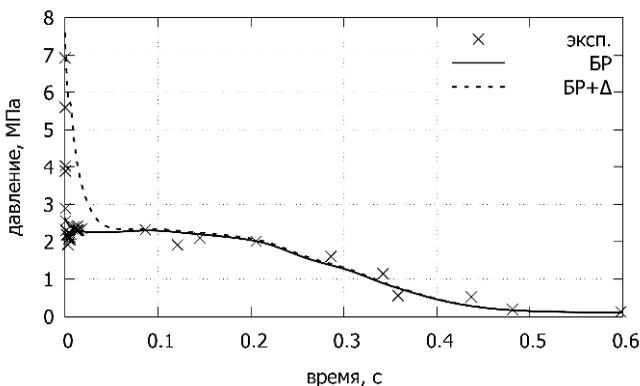


Рис. 6. Коридор неопределённости расчёта давления (датчик GS1)

Главный вывод проделанной работы и посыл на будущее: для повышения качества АН необходимо улучшать и уточнять используемую модель объекта.

В целом, данная статья завершает демонстрационный период разработки связки ДЕКАРТ/СУСАНИН, который, на взгляд автора, заложил хорошие основы дальнейшего развития и применения.

Обобщённо, задачи (и достоинства) совместного использования ТГК и инструмента АН таковы:

- существенная экономия расчётного времени (как минимум на порядок);
- количественная оценка неопределённости результатов расчётного моделирования теплофизических процессов в ЯЭУ;
- прямая (непосредственная, в отличие от вероятностных методов) количественная оценка эффектов (влияния) различных параметров, их ранжирование по важности;
- выявление взаимосвязи различных процессов и явлений, улучшение понимания интегральных эффектов, повышение качества анализа и моделирования в целом;
- самоконтроль - вскрытие ошибок реализации/расчётов за счёт выявления (непротиворечивости) взаимосвязей;
- оценка накопления (изменения) ошибки расчёта во времени;
- оценка влияния пространственной дискретизации модели;
- оценка влияния временной дискретизации модели;
- улучшение микромоделей в составе ТГК, и самого ТГК в целом;
- повышение эффективности разработки и развития ТГК.

Конечными целевыми перспективами разработки пары ДЕКАРТ/СУСАНИН как единого комплекса являются:

- обоснование и уменьшение консерватизма (управление консерватизмом) при обосновании безопасности ЯЭУ;
- оптимизация систем безопасности;
- оптимизация процедур «управления авариями» и т.п

Литература

1. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии "Общие положения обеспечения безопасности атомных станций" НП-001-15. - Москва: 2019.
2. Glaeser H. et al. BEMUSE Phase VI Report. Status report on the area, classification of the methods, conclusions and recommendations. NEA/CSNI/R(2011)4. - NEA/CSNI/OECD Technical Report JT03299065, 2011.
3. IAEA. Best Estimate Safety Analysis for Nuclear Power Plants: Uncertainty Evaluation. IAEA Safety Report Series 52, Vienna, 2008.
4. Edwards A.R., O'Brien T.P.. Studies of phenomena connected with the depressurization of water reactors. Journal of British Nuclear Energy Society, vol.9, n.2, April 1970, p.125-135.
5. Carlson K.E., Ransom V.H., Wagner R.J.. The application of RELAP5 to a pipe blowdown experiment. Topical Meeting of ASME, Heat Transfer Division Nuclear Reactor Thermal-Hydraulic, Saratoga, New York, 1980. 15 p.
6. D'Auria F., Debrecin N., Galassi G.M.. Outline of Uncertainty Methodology based on Accuracy Extrapolation (UMAE). Journal of Nuclear Technology, vol.131, n.1, 1995, p.159-196.

СЕКЦИЯ 9.

«ТЕПЛОБМЕН В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ»

УДК 669.2

В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: *kafedra@tot.ispu.ru*

Гипотеза Л.А. Бровкина о механизме переноса теплоты теплопроводностью

Аннотация. Дан краткий анализ научного наследия профессора Л.А. Бровкина в части его идей о моделировании существенно неравновесных процессов теплопроводности. Приведены дифференциальные уравнения неравновесной теплопроводности, полученные Л.А. Бровкиным.

Ключевые слова: теплотехника, теплотехнология, неравновесная теплопроводность, дифференциальное уравнение, внутренняя и внешняя энергия, механизм переноса

V.V. BUKHMIROV, Doctor of Engineering, professor

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: *kafedra@tot.ispu.ru*

Hypothesis L.A. Brovkin on the transfer mechanism heat conduction

Abstract. A brief analysis of the scientific heritage of Professor L.A. Brovkin in terms of his ideas on modeling essentially nonequilibrium processes of heat conduction. The differential equations of nonequilibrium heat conduction obtained by L.A. Brovkin.

Key words: heat engineering, heat technology, non-equilibrium heat conduction, differential equation, internal and external energy, transfer mechanism

Научные интересы профессора Леонида Александровича Бровкина были связаны с решением задач тепломассообмена в промышленных печах, которые условно подразделяют на задачи внутреннего тепломассообмена (теплопроводность и диффузия) и задачи внешнего тепломассообмена (конвективный и радиационный теплообмен и конвективная диффузия). Заметим, что этот раздел прикладной науки в 60-е и 70-е годы XX-го века называли сначала газопечной или металлургиче-

ской теплотехникой, а затем по предложению профессора А.Д. Ключникова – теплотехнологией [1].

Леонид Александрович в 1947 году с отличием окончил Московский институт стали и сплавов и проработав на литейном производстве машиностроительного завода в Муроме три года, в 1950 году поступил в аспирантуру на кафедру газопечной теплотехники Ивановского энергетического института. Защитив в 1955 году в Ученом совете МИСиС кандидатскую диссертацию, Л.А. Бровкин продолжил свою работу на кафедре газопечной теплотехники, объединив вокруг себя группу молодых ученых-теплотехников. При решении сопряженных задач теплообмена Л.А. Бровкин рассматривал внешний теплообмен в, так называемом, нулевом приближении, используя понятие температуры печи (температуры газа) и, предложенный В.Н. Тимофеевым, приведенный коэффициент излучения «газ-кладка-металл». Основное внимание в своей научной деятельности Л.А. Бровкин уделял проблемам переноса теплоты теплопроводностью в твердых, жидких и газообразных средах, результаты решения которых он оформил в виде докторской диссертации «Исследование процессов нагрева и плавления», которую он успешно защитил 6 января 1970 года в Московском институте стали и сплавов в Объединенном Совете по присуждению ученых степеней в области газопечной теплотехники и металлургических печей [2]. Особо отметим, что в качестве официальных оппонентов по докторской диссертации выступили известные ученые-теплотехники чл.-корр. АН БССР д.т.н., проф. А.И. Вейник, д.т.н., проф. Э.М. Гольдфарб и д.т.н., проф. Б.Я. Любов.

При совместном решении задач внутреннего и внешнего теплообмена Л.А. Бровкин предложил оригинальный численно-аналитический метод дискретного удовлетворения краевых условий (ДУКУ), развитый в трудах его учеников среди которых своей эрудицией и научным интеллектом выделялась Людмила Сергеевна Крылова [3]. Для систематизации известных аналитических решений краевой задачи теории теплопроводности Л.А. Бровкин предложил обобщенные на все три тела простейшей формы (бесконечная пластина, бесконечный цилиндр и шар) функции при граничных условиях I, II и III родов, так называемые лямбда-функции температурного поля, применение которых значительно упрощает практическое использование известных решений [2,4].

В список научных трудов Л.А. Бровкина (более четырехсот научных и методических работ) входят учебники и учебные пособия, востребованные и в настоящее время [4 - 8]. При решении большинства практических задач теплотехники, которая включает в себя и теплоэнергетику и теплотехнологию, расчеты теплопроводности основаны на феноменологическом методе исследования, согласно которому механизм переноса теплоты не рассматривается в силу допущения о бесконечно большой скорости распространения теплоты в веществе, и соответственно бесконечно малом времени релаксации – времени усвоения порции энергии частицами вещества. При этом для описания физиче-

ских свойств вещества в расчетах теплообмена используют коэффициенты, полученные опытным путем, которые называют теплофизическими коэффициентами. В существенно неравновесных процессах теплообмена, которые происходят при большой мощности тепловыделения (взрыв, лазерный нагрев), в области сверхнизких температур (в районе нуля Кельвина), в разреженных газах и для тел с малыми размерами (наноструктуры) необходимо учитывать неравновесный механизм теплопроводности [10]. Обзор основных известных в настоящее время моделей учета конечной скорости распространения теплоты в процессе теплопроводности довольно широко опубликованы в научной литературе, например, в монографии [11]. Однако описание моделей и гипотез неравновесной теплопроводности, предложенных профессором Л.А. Бровкиным, в специальной литературе либо отсутствуют, либо упоминаются весьма поверхностно. Поэтому в юбилейный год мы считаем своим долгом ещё раз назвать некоторые научные положения теории теплопроводности, предложенные известным ученым-теплотехником Леонидом Александровичем Бровкиным, который считал, что теплопроводность – это сложный собирательный процесс переноса квантами (фотонами и фононами) «полноценных» форм энергии, генерируемых из теплового движения частиц вещества (молекул, атомов, ионов, электронов). Кванты с равной вероятностью перемещаются по всем направлениям в теле, поглощаются, и вновь преобразуются в тепловую энергию частиц тела аналогично диссипации «полноценных» форм энергии [4]. При этом для неравновесных процессов основной закон теплопроводности предложено записывать через полную производную:

$$q = \lambda \frac{dT}{dx} = \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{dt}{dx} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\lambda}{w} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

И, применяя закон теплопроводности в виде (1), дифференциальное уравнение теплопроводности, например, для бесконечной пластины с постоянными свойствами принимает вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{a}{W} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial \tau}, \quad (2)$$

где W – скорость квантов энергии в процессе теплопроводности.

Продолжая работу над своей теорией в 80-е годы прошлого века Л.А. Бровкин опубликовал несколько статей в журнале «Известия ВУЗов. Энергетика», посвященных неравновесным процессам теплопроводности, в которых утверждал, что перенос теплоты, как энергии хаотических движений частиц тела, возможен только при помощи энергии-посредника за счет потока фотонов, фононов и электронов – носителей «полноценных» форм энергии. При этом неизбежно в процесс теплопроводности происходит и вовлечение (перенос) массы, то есть оба эти процесса – процессы переноса массы и тепловой формы энергии всегда *взаимосвязаны* [12].

При описании процесса теплопроводности наряду с внутренней энергией тепловых движений частиц U , Дж/м³, Л.А. Бровкин вводит принципиально новое понятие *внешней энергии* по отношению к частицам носителям тепловой внутренней энергии внутри тела, концентрацию которой он определил формулой [12]:

$$\Theta = \frac{q}{W}, \quad (3)$$

где Θ – концентрация внешней энергии, Дж/м³; q – плотность теплового потока, поступающего на тело из окружающей среды, Вт/м²; W – скорость переноса квантов энергии в объеме тела, м/с.

В нестационарных процессах теплопроводности U и Θ связаны формулой:

$$\Theta = \frac{dU}{dt} \tau_p, \quad (4)$$

где τ_p – время релаксации.

В стационарных режимах теплопроводности $dU/dt = 0$, откуда из формулы (4) следует $\Theta = 0$, что не соответствует действительности. Поэтому для расчета внешней энергии в стационаре была предложена формула [12]:

$$\Theta = B^2 \rho W^2, \quad (5)$$

где комплекс $B = q / \rho W^3$, зависящий от плотности теплового потока и температуры тела, который в работе [13] в знак уважения к известному ученому предложено было назвать критерием Бровкина и записать в виде:

$$Br = \frac{q}{\rho W^3} = \frac{\Theta}{\rho W^2}. \quad (6)$$

Из последней формулы, которая записана с учетом выражения (3), следует физический смысл критерия Бровкина. Данный критерий характеризует отношение полной внешней энергии переносчиков теплоты к их кинетической энергии. Л.А. Бровкин подчеркивает, что и в стационарном режиме теплопроводности существует и циркуляционный перенос массы в пределах элементарных слоев, равных по толщине длине свободного пробега кванта энергии [12].

Используя понятие внешней энергии Θ и внутренней энергии U , профессор Бровкин предложил основной закон для неравновесной теплопроводности записывать в виде:

$$\vec{q} = -a \nabla (U + \Theta), \quad (7)$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Подставляя закон теплопроводности (7) в дифференциальное уравнение теплопроводности, записанное через плотность теплового пото-

ка, можно получить дифференциальное уравнение теплопроводности для неравновесных процессов в терминах полной энергии тела. Данный вывод в литературе обнаружить не удалось, поэтому есть место научному подвигу для молодых ученых.

В заключение краткого доклада приведем гиперболическое уравнение неравновесной теплопроводности со смешанными производными. полученное Л.А. Бровкиным [12], решение которого существенно точнее, чем решение известного гиперболического уравнения [14]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \tau_p \frac{\partial^2 T}{\partial \tau^2} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{a}{W} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial \tau} + a \cdot \tau_p \frac{\partial^3 T}{\partial x^2 \partial \tau} + \frac{a^2}{W} \cdot \frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \quad (8)$$

Выводы

1. Уделяя в своих научных трудах большое внимание моделированию существенно неравновесной теплопроводности, раскрывая механизм переноса внутренней тепловой энергии в теле, профессор Л.А. Бровкин считал, что неучет неравновесности и тепловой инерции в процессе теплопроводности может приводить к погрешности расчета температурных полей даже в диффузионных процессах переноса теплоты и, особенно, при решении обратных задач теплопроводности, которые востребованы при экспериментальном определении теплофизических коэффициентов вещества.

2. В настоящее время актуальность научного наследия Леонида Александровича Бровкина возрастает в связи с появлением новых технологий, связанных с существенно неравновесным теплообменом в наноструктурах и использованием лазеров для изменения теплового состояния вещества.

Литература

1. Ключников, А.Д. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки. Учебник для вузов / И.И. Перелетов, Л.А. Бровкин, Ю.И. Розенгарт, Н.И. Иванов. А.П. Шурыгин, В.В. Чичков, А.Д. Ключников, А.М. Кулаков, Е.А. Чуланов, С.С. Сахаров, И.П. Морозов: Под ред. Ключников А.Д. -М.: Энергоатомиздат. 1989. – 336 с
2. Бровкин, Л.А. Исследование процессов нагрева и плавления. Автореферат дисс. на соискание ученой степени докт. техн. наук М.: МИСиС. 1969, 45 с.
3. Крылова, Л.С. Исследование сопряженных температурных полей металла, кладки и газа в промышленных печах Автореферат дисс. канд. техн. наук. М.: МИСиС, 1973, 24 с.
4. Бровкин, Л.А. Температурные поля тел при нагреве и плавлении в промышленных печах / Л.А. Бровкин / Изд-во ИЭИ. – Иваново, 1973. – 364 с.
5. Бровкин, Л.А. Теплообмен и температурное поле в рабочем пространстве промышленных печей / Л.А. Бровкин / Изд-во ИЭИ. – Иваново, 1974. – 189 с.
6. Бровкин, Л.А. Классификация, конструктивные схемы и вопросы эксплуатации промышленных печей / Л.А. Бровкин / Учебное пособие / Изд-во ИЭИ – Иваново, 1976. 82 с.
7. Бровкин, Л.А. Режимы работы промышленных печей и оптимальное управление режимами / Л.А. Бровкин: Учеб. пособие. Изд-во ИЭИ – Иваново, 1977. – 75 с.

8. Бровкин, Л.А. Тепловой баланс промышленной печи / Л.А. Бровкин / Изд-во ИЭИ – Иваново, 1977. – 54 с.

9. Бровкин, Л.А. Теплообмен и тепловые режимы промышленных печей: учеб. пособие / Л.А. Бровкин / Ивановский гос. университет. Иваново, 1982. 88 с.

10. Zhang Z.M. Nano/Microscale Heat Transfer. NY: McGraw-Hill Book Company, 2007. 504 p.

11. Кирсанов, Ю.А. Моделирование теплофизических процессов / Ю.А. Кирсанов. – Санкт-Петербург: Политехника, 2022. – 231 с.

12. Бровкин, Л.А. Процесс теплопроводности как единство процессов переноса в пространстве энергии и массы / Вопросы тепломассообмена, энергосбережения и экологии в теплотехнических процессах: сборник науч. трудов / под ред. Н.П. Гусенковой – Иваново, 2003. с. 5-10.

13. Бухмиров, В.В. Краткое предисловие редактора тезисов доклада профессора Л.А. Бровкина на методологическом семинаре ПТЭФ / Вопросы тепломассообмена, энергосбережения и экологии в теплотехнических процессах: Сборник научных трудов Под. ред. Н.П. Гусенковой – Иваново, 2003. с. 4.

14. Исаченко, В.П. Теплопередача: учеб. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

УДК 669.045

ЗАПОЛЬСКАЯ Е.М.¹, соискатель
ТЕМЛЯНЦЕВ М.В.², д.т.н.
ТЕМЛЯНЦЕВА Е.Н.², к.т.н.

^{1,2} Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42
E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru¹, uchebn_otdel@sibsiu.ru²

Разработка ресурсосберегающих температурных режимов разогрева углеродсодержащих футеровок 350-T сталеразливочных ковшей

Аннотация. Проведено исследование влияния температурных режимов на технико-экономические показатели работы станда и качество нагрева футеровки сталеразливочных ковшей. Рассмотрен температурный малообезуглероживающий ресурсосберегающий режим разогрева футеровки.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, огнеупор, углеродсодержащая футеровка, температурный режим

ZAPOLSKAYA E.M.¹, applicant
TEMLYANTSEV M.V.², Dr. Sci. (Eng.)
TEMLYANTSEVA E.N.², Dr. Sci. (Eng.)

^{1,2} Siberian State Industrial University,
654007 Novokuznetsk, Kirova str. 42
E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru¹, uchebn_otdel@sibsiu.ru²

Development of resource-saving temperature regimes for heating carbon-containing linings of 350-T steel ladles

Abstract. A study of the influence of temperature conditions on the technical and economic performance of the stand and the quality of heating of the lining of steel ladles was carried out. The temperature low-carbonizing resource-saving heating mode of the lining is considered.

Key words: steel ladle, refractory, carbon-containing lining, temperature regime

В настоящее время углеродсодержащие огнеупоры получили широкое распространение как материал для выполнения рабочего слоя футеровки сталеразливочных ковшей [1]. Наиболее высокий комплекс эксплуатационных свойств показывают безобжиговые периклазоуглеродистые (ПУ) и алюмопериклазоуглеродистые (АПУ) огнеупоры [2, 3]. Одним из недостатков углеродсодержащих футеровок является взаимодействие при высоких температурах углерода, содержащегося в огнеупоре, с кислородом и другими газами (окислителями), в результате чего на поверхности футеровки образуется обезуглероженный слой. Характерно, что обезуглероживание углеродсодержащих ковшевых футеровок происходит не только во время транспортирования жидкой стали, внепечной обработки и разливки, но и на стадии разогрева футеровки перед приемом расплава [4–6]. Наиболее интенсивно обезуглероживание происходит при первом разогреве новой футеровки, поскольку на ее поверхности отсутствуют остатки металла и шлака, препятствующие свободному доступу газов-окислителей к огнеупорам. Как показывают проведенные ранее исследования глубина обезуглероженного слоя после первого разогрева футеровки сталеразливочных ковшей может достигать 8–10 мм, а в некоторых случаях и более [4, 5]. Поскольку обезуглероженный слой огнеупоров характеризуется более высокими пористостью, смачиваемостью металлом и шлаком, пониженными эксплуатационными свойствами, его разрушение происходит гораздо быстрее, чем огнеупора с исходным количеством углерода. Проблема повышения стойкости ковшевых футеровок и срока их службы в настоящее время является актуальной задачей.

На основании результатов собственных экспериментальных исследований кинетики высокотемпературного обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров и опыта разработки малообезуглероживающих температурных режимов разогрева периклазоуглеродистых ковшевых футеровок [7–11], для условий 350-т сталеразливочных ковшей кислородно-конвертерного цеха № 2 АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» проведена серия многовариантных расчетов с применением математической модели [9].

За базовый вариант приняты температурный режим и технология разогрева футеровки, используемые на предприятии. Разогрев реализуется на стенде высокотемпературного нагрева сталеразливочных ковшей № 1, 1а ККЦ-2. Стенды оборудованы водоохлаждаемой горелкой Pyretron. В конструкции горелки предусмотрен принцип двухстадийного сжигания природного газа. Время первой стадии сгорания кисло-

род вводится в струю природного газа. В результате возникшей реакции пиролиза создается яркое ядро пламени, сформированное продуктами неполного сгорания природного газа, содержащими микрочастицы сажистого углерода. На второй стадии сгорания осуществляется введение воздушных струй (воздух обогащен кислородом), которые активно смешиваются, окисляя микрочастицы и остаточные радикалы углеводородов, окиси углерода и водорода. Таким образом, обеспечивается более полное горение природного газа снижение вредных выбросов монооксида углерода и оксидов азота.

В соответствии с режимной картой работы стендов максимальный расход $V_{\text{макс}}$ природного газа на стенд составляет $460 \text{ м}^3/\text{ч}$, номинальный $V_{\text{ном}} = 250 \text{ м}^3/\text{ч}$, минимальный $V_{\text{мин}} = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$, соотношение газ : кислород : воздух – 1 : 1 : 10, коэффициент избытка воздуха 1,1. Конструкция футеровки представлена в разделе 4.5. Рабочий слой стен выполнен из алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров марки АМС 78-8/7HG.

На рис. 1 представлен существующий температурный режим сушки и разогрева футеровки 350-т сталеразливочных ковшей в ККЦ-2, расход топлива на стенд и температурные поля по толщине футеровки в различные периоды времени. Анализ графиков, представленных на рис. 1 показывает, что температурный режим содержит четыре стадии. Стадия 1 и 2 относятся к периоду сушки футеровки после капитального ремонта и предназначены для предварительного нагрева и выдержки футеровки при $300 \text{ }^\circ\text{C}$ с целью удаления влаги, содержащейся в основном в арматурном слое. На стадии 3 происходит разогрев футеровки со скоростью порядка $80 \text{ }^\circ\text{C}/\text{ч}$. Стадия 4 представляет собой высокотемпературную выдержку при температуре поверхности футеровки близкой к $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, предназначенную для прогрева футеровки по толщине. Продолжительность анализируемого режима составляет 20 ч. В конце разогрева футеровка имеет температуру поверхности $1299 \text{ }^\circ\text{C}$, температуру на стыке рабочего и арматурного слоев $918 \text{ }^\circ\text{C}$, температуру кожуха $118 \text{ }^\circ\text{C}$, максимальный перепад по толщине рабочего слоя достигает своего максимума $360 \text{ }^\circ\text{C}$ после 17 ч разогрева. Общий объем Q_r природного газа на разогрев составляет 4619 м^3 . Расход газа V на реализацию температурного режима соответствует возможностям горелочного устройства.

Как видно из рис. 1 обезуглероживание рабочего слоя огнеупоров начинается после 10 ч разогрева. В конце разогрева глубина обезуглероженного слоя достигает $7,9 \text{ мм}$. При текущей стойкости футеровки ковшей 89 плавков допустимый износ составляет 100 мм , соответственно износ за одну плавку в среднем достигает $100/89 = 1,12 \text{ мм}$. Таким образом, обезуглероживание огнеупора на $7,9 \text{ мм}$ может привести к снижению стойкости футеровки почти на семь плавков.

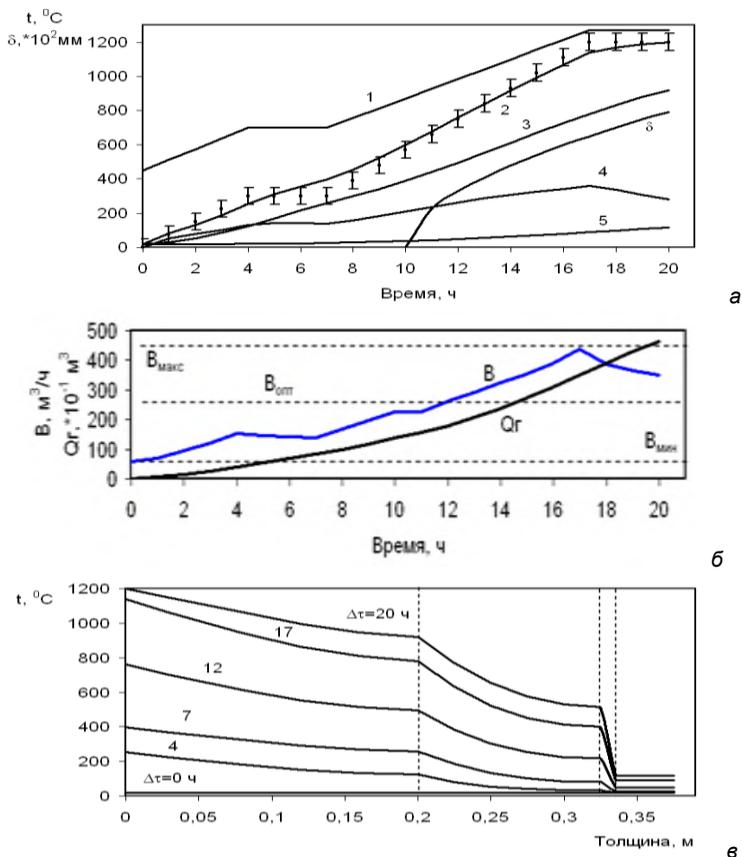


Рис. 1. Температурный режим разогрева (а), расходы и объемы природного газа (б), распределение температур по толщине футеровки (в) при существующей на предприятии теплотехнологии: 1 – температура греющей среды, 2 – температура поверхности футеровки (точками показаны рекомендованный на предприятии график изменения температуры футеровки), 3 – температура на стыке рабочего и арматурного слоев, 4 – перепад температур по толщине рабочего слоя, 5 – температура кожура

В целях снижения глубины обезуглероженного слоя предлагается малообезуглероживающий ресурсосберегающий режим разогрева (показан красной штриховой линией), принципиальная схема которого представлена на рис. 2.

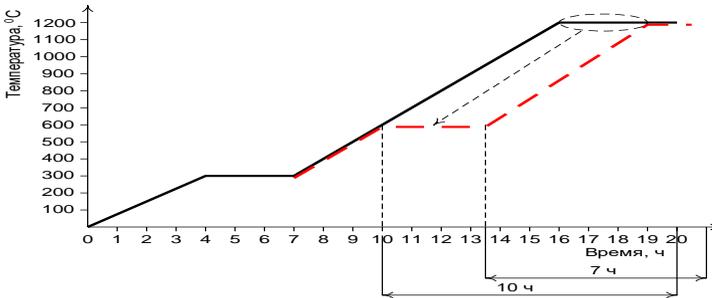


Рис. 2. Принцип реализации малообезуглероживающего ресурсосберегающего режима разогрева футеровки

Отличительной особенностью данного режима является частичный или полный перенос (на рис. 2 показан штриховой стрелкой) высокотемпературной выдержки с целью прогрева футеровки в среднетемпературную область (менее $650\text{ }^{\circ}\text{C}$), в которой процессы обезуглероживания протекают с низкой скоростью. Таким образом за стадией сушки следует стадия разогрева футеровки до $600\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выдержка при этих температурах. Далее происходит разогрев до конечных температур. Высокотемпературная выдержка при этом может быть сокращена или ликвидирована в зависимости от достижения параметров качества нагрева и прогрева футеровки. Продолжительность разогрева в таких условиях может оставаться прежней или несколько увеличенной, в зависимости от имеющихся резервов по производительности отделения разогрева ковшей. Эффект предлагаемого режима основан на том, что при существующем режиме продолжительность интенсивного обезуглероживания огнеупоров рабочего слоя составляет 10 ч, а в малообезуглероживающем – 7 ч (т.е. на 3 ч меньше).

На основе математической модели [9] проведены многовариантные расчеты для практической разработки принципа, представленного на рис. 2. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Малообезуглероживающий, ресурсосберегающий режим разогрева со среднетемпературной промежуточной выдержкой в течение 3,5 ч при температуре поверхности футеровки менее $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и высокотемпературной выдержкой в течение 1,5 ч при температуре греющей среды $1275\text{ }^{\circ}\text{C}$ обеспечивает разогрев футеровки до температуры поверхности $1183\text{ }^{\circ}\text{C}$, температуры на стыке рабочего и арматурного слоев $823\text{ }^{\circ}\text{C}$, кожуха $114\text{ }^{\circ}\text{C}$. Продолжительность нового режима составляет 20,5 ч (при допустимой, по условиям производительности отделения разогрева сталеразливочных ковшей, продолжительности 21 ч). Максимальный перепад по толщине рабочего слоя достигает своего максимума $374\text{ }^{\circ}\text{C}$ после 19 ч разогрева. Общий объем Q_r природного газа на разогрев составляет 3903 м^3 , что на 15,5 % меньше при действующем режиме.

Расход газа V на реализацию температурного режима соответствует возможностям горелочного устройства.

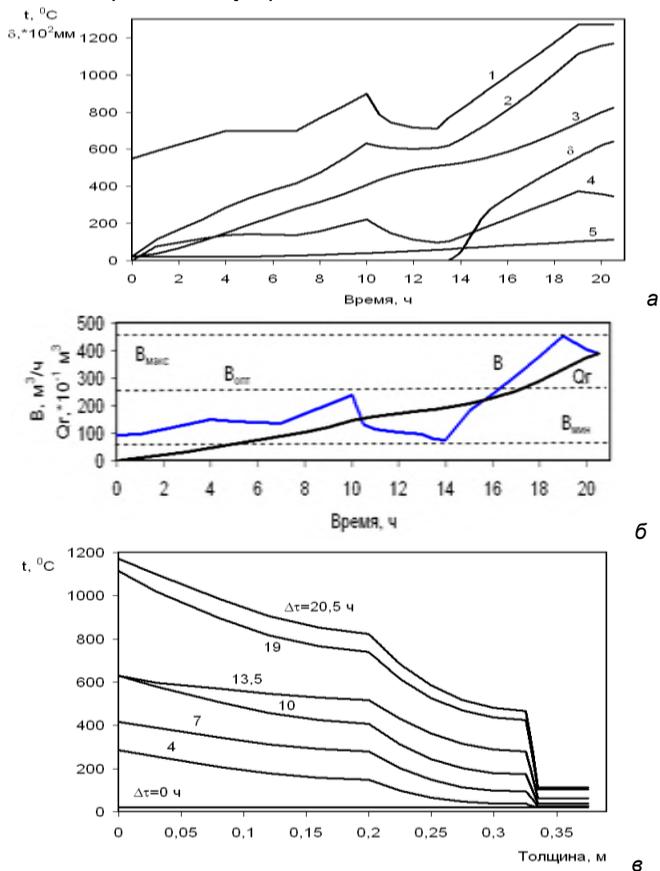


Рис. 3. Предлагаемый малообезуглероживающий ресурсосберегающий температурный режим разогрева (а), расходы и объемы природного газа (б), распределение температур по толщине футеровки (в) (обозначения те же, что и на рис. 2)

Глубина обезуглероженного слоя огнеупоров при реализации малообезуглероживающего режима составляет 6,36 мм, т.е. на 1,54 мм (20 %) меньше чем при существующем режиме, что способствует повышению качества стали по неметаллическим включениям. При износе футеровки 1,12 мм за плавку такое снижение глубины обезуглероженного слоя обеспечивает повышение стойкости футеровки на 1 плавку, т.е. до уровня 90 плавков.

В табл. 1 представлены сводные данные сравнительного анализа существующего и предлагаемого режима разогрева. Малообезуглероживающий режим обеспечивает более экономичную тепловую работу станда. При его реализации удельный расход условного топлива снижается с 19,0 до 16,0 кг у.т./ т стали.

Таблица 1. Сводные данные сравнительного анализа существующего и предлагаемого режима разогрева

Параметр	Режимы		Разность (С – М)
	существующий (С)	малообезуглероживающий (М)	
Продолжительность, ч	20	20,5	+0,5 ↑
Температура:			
- поверхности футеровки	1199	1183	– 16 ↓
- на стыке рабочего и арматурного слоев	918	823	– 95 ↓
- кожура	118	114	– 4 ↓
- максимальная греющей среды	1270	1275	+ 5 ↑
Общий объем $Q_г$ природного газа, м ³	4619	3903	– 716 ↓
Общий объем кислорода, м ³	4619	3903	– 716 ↓
Глубина обезуглероженного слоя δ , мм	7,90	6,36	– 1,54 ↓
Стойкость ковша, плавков (наливов)	89	90	+ 1 ↑
Параметры теплового баланса, %:			
- химическое тепло топлива $Q_т^x$	96,9	97,0	+ 0,1
- физическое тепло окислителя $Q_{ок}$	0,7	0,7	0
- химическое тепло обезуглероживания огнеупора $Q_{об}^x$	2,4	2,3	– 0,1
- потери тепла теплопроводностью через футеровку в окружающую среду $Q_{теп}$	3,0	3,8	+ 0,8 ↑
- потери тепла с уходящим дымом $Q_д$	43,6	39,3	– 4,3 ↓
- тепло, аккумулируемое футеровкой $Q_{ак.ф}$	40,5	44,1	+ 3,6 ↑
- потери тепла излучением $Q_{из}$	5,0	4,1	– 0,9 ↓
- потери тепла с охлаждающей водой $Q_{вод}$	1,9	2,3	+ 0,4 ↑
- неучтенные потери $Q_{н.п}$	6,0	6,4	+ 0,4 ↑
Расход топлива V , м ³ /ч:			
- максимальный	437	453	+ 16 ↑
- минимальный	59	57	– 2 ↓
- средний за период разогрева	234	191	– 43 ↓
Удельный расход условного топлива $V_{уд}$, кг у.т./ т стали	19,0	16,0	– 3 ↓
Затраты топлива и кислорода на реализацию режима, руб.	38218	32293	– 5925 ↓

Примечание: зеленый цвет стрелки улучшение параметра, красный ухудшение с точки зрения качества нагрева или тепловой эффективности

Для малообезуглероживающего режима характерны меньшие объемы природного газа и кислорода, затрачиваемые на разогрев, это

приводит к снижению затрат на один разогрев на 5925 руб. (при текущей стоимости природного газа 5,014 руб./м³ и кислорода 3,26 руб./м³).

Вывод. С применением математической модели разработан малообезуглероживающий температурный режим разогрева футеровок 350-т сталеразливочных ковшей, обеспечивающий более экономичную тепловую работу стэнда и повышение стойкости футеровки на 1 плавку.

Литература

1. Кривандин В.А., Егоров А.В. Тепловая работа и конструкции печей черной металлургии. – Москва: Металлургия, 1989. – 464 с.
2. Маргишвили А.П., Можжерин А.В., Мусевич В.А., Дука А.П. // Новые огнеупоры. 2011. № 11. С. 15–21.
3. Вислогузова Э.А., Кашцев И.Д., Серова Л.В., Хороших М.А. // Новые огнеупоры. 2010. № 1. С. 7–10.
4. Темлянцеv М.В., Матвеев М.В. Обезуглероживание периклазоуглеродистых огнеупоров при тепловой обработке футеровок сталеразливочных ковшей // Металлург. 2010. № 8. С. 60–62.
5. Темлянцеv М.В., Матвеев М.В. Исследование обезуглероживания периклазоуглеродистых огнеупоров при разогреве футеровок сталеразливочных ковшей перед приемом расплава // Известия вузов. Черная металлургия. 2010. № 10. С. 38–40.
6. Темлянцеv М.В., Матвеев М.В., Темлянцева Е.Н. Исследование влияния различных факторов на обезуглероживание периклазоуглеродистых ковшовых огнеупоров // Известия вузов. Черная металлургия. 2011. № 10. С. 32–36.
7. Запольская Е.М., Темлянцеv М.В., Костюченко К.Е. Анализ основных направлений повышения энерготехнологической эффективности стэндов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей // Вестник Российской Академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. 2013. № 15. С. 128–134.
8. Якушевич Н.Ф., Запольская Е.М., Темлянцеv М.В., Протопопов Е.В., Темлянцева Е.Н., Приходько М.С. Исследование процессов обезуглероживания периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 8. С. 555 – 562.
9. Запольская Е.М., Феоктистов А.В., Темлянцеv М.В., Бухмиров В.В., Бушуев Е.Н. Разработка детерминированной математической модели процессов теплообмена при разогреве футеровок сталеразливочных ковшей / // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2018. № 1. С. 25 – 33.
10. Протопопов Е.В., Темлянцеv М.В., Запольская Е.М., Максакова К.Е., Дегтярь В.А. Исследование высокотемпературного обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров // Известия вузов. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 12. С. 24 – 28.

УДК 536.33:536.244

Б.В. БОРИСОВ, д.ф.-м.н., профессор,
А.В. ВЯТКИН, аспирант,
Г.В. КУЗНЕЦОВ, д.ф.-м.н., профессор,
В.И. МАКСИМОВ, к.т.н., доцент,
Т.А. НАГОРНОВА, к.т.н., доцент,
С.О. САЛАГАЕВ, магистрант

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Инженерная школа энергетики, Научно-образовательный центр И.Н.Бутакова
634508 г. Томск, пр-кт. Ленина, д.30-А
E-mail: bvborisov@tpu.ru, elf@tpu.ru,

Экспериментальный анализ теплообмена локальной зоны при ее нагреве газовым инфракрасным излучателем

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований при обогреве локальной рабочей зоны газовым инфракрасным излучателем с работающей системой вентиляции. В экспериментах проводились измерения температуры на оси симметрии ГИИ, а также исследовалось движение воздуха над горизонтальной панелью SIV-методом.

Ключевые слова: газовый инфракрасный излучатель, SIV-метод, лучистая система отопления, система вентиляции

B.V. BORISOV, Dr. Sc. (Phys.-Math.)
A.V. VYATKIN, student,
G.V. KUZNETSOV, Dr. Sc. (Phys.-Math.)
V.I. MAKSIMOV, PhD,
T.A. NAGORNOVA, PhD,
S.O. SALAGAEV, student

National Research Tomsk Polytechnic University, School of Energy Engineering,
Scientific and educational center I.N. Butakova
634508 Tomsk, St. Lenin, 30-A
E-mail: bvborisov@tpu.ru, elf@tpu.ru,

Experimental analysis of heat and mass transfer of a local zone heated by a gas infrared heater

Abstract. The results of experimental studies are given for heating the local working zone with a gas infrared heater and ventilation system. In the experiments, the temperature was measured on the GIH symmetry axis, and the air movement over the horizontal panel was studied by the SIV-method.

Key words: gas infrared heater, SIV-method, radiant heating system, ventilation system

Определение температуры воздуха и скорости его движения рабочей зоне производственного помещения, обогреваемого газовым инфракрасным излучателем (ГИИ) необходимо для выявления оптимальных параметров микроклимата при проектировании системы отопления. Проведение экспериментальных исследований позволяет получить информационную базу, для дальнейшего изучения процесса обогрева локальной рабо-

чей зоны в различных условиях при помощи математического моделирования. Данный подход позволяет получить наиболее оптимальные условия микроклимата в рабочей зоне при проектировании лучистой системы отопления на основе газовых инфракрасных обогревателей светлого типа. Схема экспериментального бокса с горизонтальной панелью, имитирующей оборудование, представлено на рис. 1.

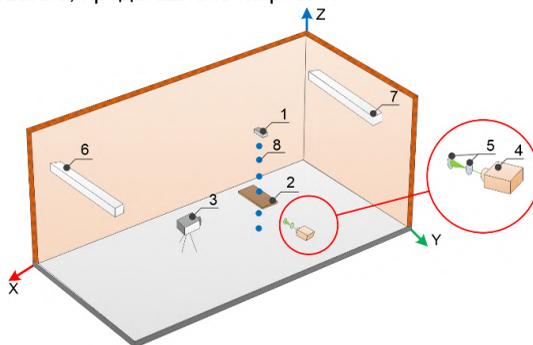


Рис. 1. Схема экспериментального:

- 1 – ГИИ, 2 – горизонтальная панель, 3 – высокоскоростная видеокамера,
4 – лазер, 5 – система зеркал для преобразования лазерного луча,
6 – приточная вентиляция, 7 – вытяжная вентиляция, 8 – датчики температуры

Экспериментальные исследования проводились в изолированном боксе. ГИИ располагался на расстоянии 1,6 м от левой стены и при расстоянии от пола до нижней поверхности излучателя 3 м. Горизонтальная панель из древесного материала размерами 1,2x0,6,0,04 м располагалась на каркасе из алюминиевых труб с пластиковым наружным покрытием. Горизонтальная панель находится на отметке 0,755 м от поверхности пола. Высокотеплопроводный материал и малый диаметр трубок позволяют принять допущение о том, что используемый каркас не оказывает существенного влияния на формируемый тепловой режим в помещении. Начальная температура при проведении исследований находилась на уровне 7°C. Воздухообмен осуществлялся в однократном режиме. Время проведения экспериментов составляло 60 минут, так как ранее было установлено, что за 50 минут работы ГИИ температуры характерных поверхностей возрастают наиболее интенсивно. В дальнейшем они изменяются более чем на 1 градус [1-3]. Определение структуры векторного поля движения воздуха над горизонтальной панелью выполнялось методом SIV.

В результате экспериментов установлено, что через 60 минут исследования температура в рабочей зоне находится в диапазоне 8-9,5°C. Максимальная температура на поверхности стола достигает 14,2°C (рис. 2).

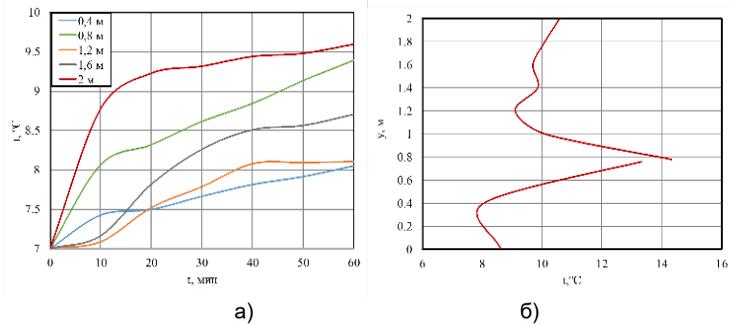


Рис. 2. Изменения температур воздуха с ростом времени на оси измерения (а) и распределения экспериментальных значений температур воздуха по координате Y на оси измерения через 60 минут исследования (б)

Анализ результатов, полученных SIV-методом показывает интенсивное движение воздуха от горизонтальной панели в сторону ГИИ, что характеризует увеличение теплового потока для обогрева локальной рабочей зоны (рис. 3).

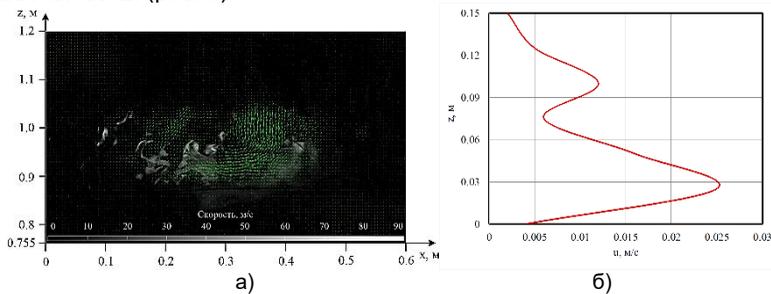


Рис. 3. Векторное поле движения воздуха над горизонтальной панелью (а) и профили скорости над горизонтальной панелью на оси симметрии ГИИ (б)

Исследование поддержано РФФ №20-19-00226.

Литература

1. Тепловые режимы локальных рабочих зон крупногабаритных помещений при использовании газовых инфракрасных излучателей / А.В. Вяткин, Б.В. Борисов, Г.В. Кузнецов, В.И. Максимов, Т.А. Нагорнова. Новосибирск: СО РАН, 156 с., 2022.
2. B.V. Borisov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova, A.V. Vyatkin. Experimental determination of the air exchange system influence on the thermal conditions of a local working area heated by a gas infrared heater // J. Phys.: Conf. Ser., vol. 2211, article ID 012022, 2022.
3. B.V. Borisov, A.V. Vyatkin, G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova. Analysis of the influence of the gas infrared heater and equipment element relative positions on industrial premises thermal conditions // Energies, vol. 15, article ID 8749, 2022.

УДК 62-665.4: 536.7

Р.И. ЕГОРОВ к.ф.-м.н.
Р.И. ТАБУРЧИНОВ,
М.В. БЕЛОНОГОВ, аспирант

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов
634050, г.Томск, проспект Ленина, 30.
E-mail: rommel@tpu.ru

Сравнение эффективности различных механизмов нагрева при зажигании водоугольных топливных смесей

Аннотация. В работе проведено исследование сравнительной эффективности конвективного и радиационного нагрева при зажигании капель водоугольной суспензии. Показано, что в области низких (до 850 К) температур конвективный нагрев обеспечивает меньшие времена задержки зажигания, тогда как радиационный нагрев показывает заметно более быстрое зажигание при температурах выше 900 К.

Ключевые слова: водоугольная суспензия, время задержки зажигания, тепловой поток

R.I. EGOROV, PhD
R.I. TABURCHINOV,
M.V. BELONOGOV, PHD-student

Natioanl research Tomsk polytechnic university, High-energy physics school
634050, Tomsk, Lenina av., 30
E-mail: rommel@tpu.ru

Comparative efficiency of different heating mechanisms during the ignition of the coal-water slurry

Abstract. The study of the comparative efficiency of convective and radiative heating during the ignition of droplets of coal-water suspension was carried out. It was shown that in the region of low (up to 850 K) temperatures, convective heating provides shorter ignition delay times, while radiation heating shows noticeably faster ignition at temperatures above 900 K.

Key words: coal-water slurry, ignition delay time, heat flow.

Выбор оптимального метода зажигания топлива зависит от его свойств, допустимого расхода, а также требуемого температурного режима внутри топки. Использование водоугольных топлив (ВУТ), приготовленных из отходов обогащения углей, делает печь еще более требовательной к эффективности зажигания в силу низкой реакционной способности такого топлива [1]. Использование дополнительной (мазутной или газовой) горелки для подогрева топки и подсвета факела ВУТ позволяет повысить вероятность зажигания и стабильность горения. Однако, актуальность исследований, направленных на оптимизацию зажигания ВУТ остается достаточно высокой в силу того, что вре-

мена задержки зажигания таких топлив существенно превосходят наблюдающиеся для угле-пылевых или жидких топлив [2]. На рис.1а показаны измеренные зависимости времени задержки зажигания ВУТ от температуры для разных механизмов нагрева.

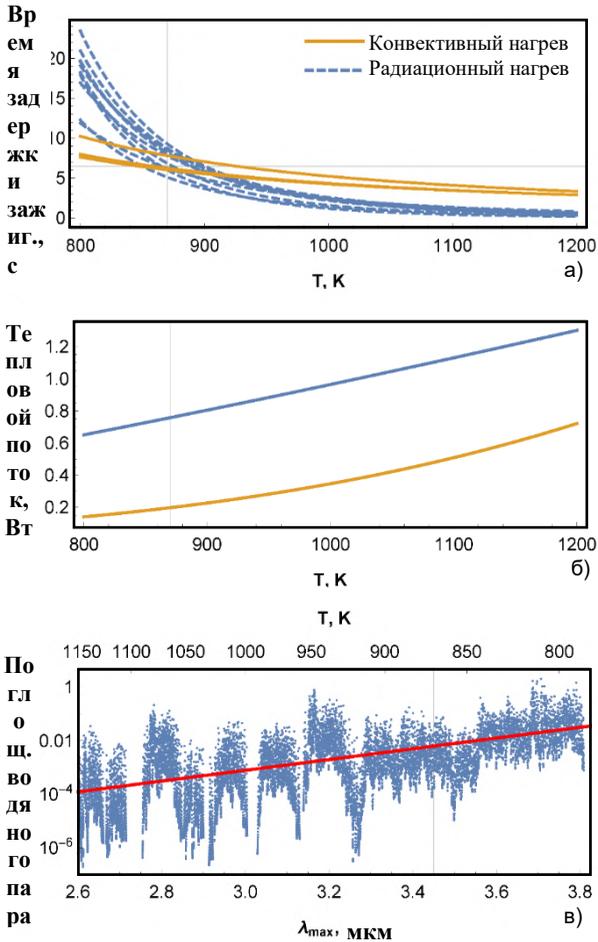


Рис. 1. Времена задержки зажигания (кривые одного цвета соответствуют вариации состава топлива в пределах 5 вес.%) при разной температуре в топке и различных схемах нагрева ВУС (а), тепловые потоки при разных механизмах нагрева (б) и спектр поглощения водяного пара в ИК диапазоне (в).

При использовании радиационного нагрева (в широком диапазоне температур) тепловой поток более, чем втрое превышает уровни характерные для нагрева в потоке горячего воздуха (чисто конвективный нагрев, рис. 1б). Однако, из рис. 1а видно, что при температурах менее 850 К ВУТ загорается быстрее при конвективном нагреве, чем при радиационном. При росте температуры свыше 900 К начинает очевидно доминировать радиационный нагрев. Характерные времена задержки загорания становятся в 3-5 раз меньше тех, что наблюдаются при конвективном нагреве при аналогичной температуре.

Анализ причин данного явления показал, что падение эффективности радиационного нагрева при низких температурах происходит из-за влияния поглощения теплового излучения облаком водяного пара, выходящего из капли топлива при ее нагреве. Из рис.1в видно, что коэффициент поглощения водяного пара быстро падает с ростом температуры. На длинах волн теплового излучения, соответствующих температурам менее 850 К, поглощение водяного пара на один-два порядка величины превосходит то, что наблюдается для температур свыше 900 К. В результате, при низких температурах паровая оболочка экранирует капли ВУТ, задерживая рост температуры их поверхности и, соответственно, увеличивая времена задержки загорания ВУТ. При использовании конвективного нагрева в воздушном потоке, водяной пар сдувается и не препятствует нагреву ВУТ.

Таким образом, можно заключить, что для первичного загорания ВУТ более эффективным является нагрев потоком горячего воздуха, подачу которого можно снижать, когда температура в топке превысит 900 К. В дальнейшем, тепловое излучение разогретых стенок печи, равно как и излучение горящих капель топлива, будет достаточно эффективно разогреть подаваемое ВУТ, обеспечивая времена задержки загорания на уровне, достаточном для стабильного горения подаваемого топлива.

Литература

1. Tran H.A., de Steene L.V., Le D.D. Pyrolysis and char oxidation of biomass and coal blends: kinetic study using thermogravimetric analysis // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci, Vol. 159, 2018. P. 012035.
2. Делягин Г.Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха // In: Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольной суспензии. Сборник статей. М.: Наука, 1967.
3. Egorov R.I., Taburchinov R.I., Zaitsev A.S. Efficiency of Different Heat Exchange Mechanisms for Ignition of Coal–Water Compositions // Energy&Fuels, Vol. 33, 2019. pp. 7830-7834.

УДК 620.91

В.Ю. ПОЛОВНИКОВ, д.т.н.
С.Д. ШЕЛЕМЕХОВА, аспирант
Е.В. ЛЮБИВЫЙ, студент

Томский политехнический университет
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, д. 30
E-mail: polovnikov@tpu.ru

Растепление многолетнемерзлых пород при эксплуатации геотермальных скважин

Аннотация. В работе приведены результаты расчета радиуса растепления многолетнемерзлых пород при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири.

Ключевые слова: геотермальная энергия, математическое моделирование, радиус растепления

V.YU. POLOVNIKOV, Doctor of Engineering
S.D. SHELEMEKHOVA, graduate student
E.V. LIUBIVYI, student

Tomsk Polytechnic University
634050, Russia, Tomsk, Lenin Avenue, 30
E-mail: polovnikov@tpu.ru

Thawing of permafrost rocks during the operation of geothermal wells

Abstract. The paper presents the results of calculating the radius of thawing of permafrost rocks during the operation of geothermal wells in Eastern Siberia.

Key words: geothermal energy, mathematical modeling, warming radius

Приведены результаты численного моделирования растепления многолетнемерзлых пород при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири. Установлено, что радиус растепления многолетнемерзлых пород за период эксплуатации скважины для типичного геотермального месторождения Восточной Сибири составляет 12–17 метров при неизменной температуре энергоносителя. Показана необходимость учета неоднородности теплофизических характеристик многолетнемерзлых пород в зависимости от глубины их залегания при проектировании геотермальных площадок.

Изучению процессов оттаивания многолетнемерзлых пород под воздействием подземного источника тепла посвящено достаточно много работ [1–3]. Преимущественно исследования, подобные [1–3], описывают различные аспекты эксплуатации нефтяных и газовых скважин. Работ, посвященных растеплению многолетнемерзлых пород при эксплуатации геотермальных скважин в России, в настоящее время не

опубликовано. Очевидные различия в эксплуатации нефтегазовых и геотермальных скважин обосновывают необходимость проведения подобных исследований.

Целью данной работы является определение радиуса растепления ММП от тепловыделяющей вертикальной геотермальной скважины в реальных условиях эксплуатации в Восточной Сибири.

Рассматривается геотермальная скважина, прототипом которой является наиболее распространенный в РФ вид нефтяных скважин, колонны, кондуктор и направления которой выполнены из цемента. На рис. 1 приведено схематичное изображение рассматриваемого объекта.

Предполагается, что до начала эксплуатации геотермальной скважины в рассматриваемой области решения (рис. 1) поддерживается постоянная температура. В момент времени отличный от нуля по трубопроводу I начинает прокачиваться энергоноситель, температура которого выше, чем начальная температура в области решения. При этом предполагается, что на внутренней поверхности трубы устанавливается постоянная температура, равная температуре энергоносителя. С учетом рассматриваемых факторов, анализ растепления пород и грунтов в зоне влияния геотермальной скважины сводится к решению нестационарной задачи теплопроводности в системе «геотермальная скважина – породы/грунты».

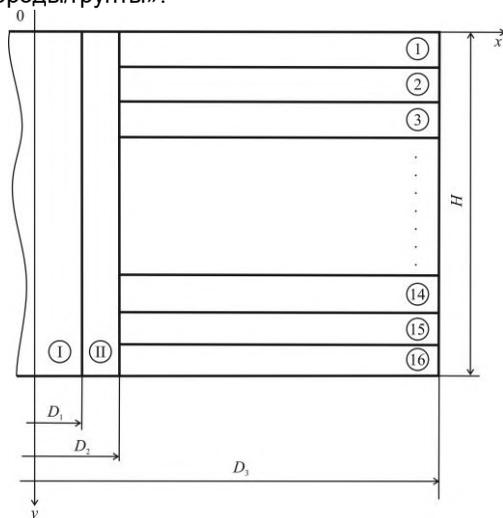


Рис. 1. Схема области решения: I – трубопровод; II – цементные колонны, кондуктор и направления; 1 – 16 – слои породы/грунта [4]

Постановка задачи, метод решения и основные исходные данные для рассматриваемой задачи аналогичны описанным в [4]. Численный анализ проводился для геотермальной скважины со следующими гео-

метрическими характеристиками: $D_1=0,073$ м; $D_2=0,53$ м; $D_3=50$ м, $H=50$ м (рис. 1). Значение температуры в рассматриваемой области решения в начальный момент времени принималось равным $T_0=272,7$ К и соответствовало типичной температуре многолетнемерзлых пород в Восточной Сибири [4]. Температура наружной среды составляла $T_{ex} = 273,15$ К, а коэффициент теплоотдачи – $\alpha = 20$ Вт/(м²·К). Температура энергоносителя внутри трубы T_1 варьировалась в диапазоне от 298.15 до 373.15 К.

Основные результаты численного моделирования радиуса растепления многолетнемерзлых пород при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири приведены в табл. 1.

Таблица 1. Максимальный радиус растепления

T_1 , К	373,15	348,15	323,15	298,15
Максимальный радиус растепления, м	16,93	15,89	14,36	11,68

Исследования проведены для периода времени соответствующего 30 годам непрерывной эксплуатации геотермальной скважины в многолетнемерзлых породах.

Результаты численного моделирования позволили сделать вывод об ожидаемом увеличении радиуса растепления с течением времени и его зависимости от температуры энергоносителя T_1 .

Значения радиусов растепления пород/грунтов в рассматриваемой области решения, приведенные в табл. 1, позволяют сделать вывод о том, что они могут достигать существенных значений (12–17 метров) и должны учитываться при проектировании геотермальных площадок.

Полученные результаты позволяют обоснованно выбирать расстояния между соседними геотермальными скважинами, эксплуатируемыми в многолетнемерзлых породах. Сетка размещения геотермальных скважин, основанная на подобных расчетах, будет способствовать оптимизации затрат на строительство площадок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 23-29-00464).

Литература

1. Горелик Я.Б., Шабров А.Б., Сысоев Ю.С. Динамика протаивания мерзлых пород в зоне влияния двух скважин // Криосфера Земли. 2008. № 1. С. 59–65.
2. Полозков К.А. Выбор расстояний между кустовыми эксплуатационными скважинами в зонах ММП // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2008. – № 3. – С. 21–29.
3. Гасумов Р.А., Кондренко О.С., Толпаев В.А. Расчет изотермического фронта протаивания многолетнемерзлой породы по данным, полученным при проводке скважины // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2011. – № 2. – С. 20–22.
4. Половников В.Ю., Цыганкова Ю.С. Радиус растепления многолетнемерзлых пород при эксплуатации нефтяных скважин в Восточной Сибири // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2014. – № 1. – С. 38 – 43.

УДК 536.33:536.244

Б.В. БОРИСОВ, д.ф.-м.н., профессор,
А.В. ВЯТКИН, аспирант,
Г.В. КУЗНЕЦОВ, д.ф.-м.н., профессор,
В.И. МАКСИМОВ, к.т.н., доцент,
Т.А. НАГОРНОВА, к.т.н., доцент,
Ф.Ю. САЛИХОВ, магистрант

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Инженерная школа энергетики, Научно-образовательный центр И.Н.Бутакова
634508 г. Томск, пр-кт. Ленина, д.30-А
E-mail: bvborisov@tpu.ru, elf@tpu.ru,

Пространственное моделирование процессов теплопереноса в помещении с газовым инфракрасным излучателем

Аннотация. Приведены результаты математического 3D моделирования процессов теплообмена при нагреве помещения газовым инфракрасным излучателем с учетом работы приточно-вытяжной вентиляции, а также наличия в помещении элемента лабораторного оборудования и человеческой фигуры.

Ключевые слова: газовый инфракрасный излучатель, смешанная конвекция, лучистый тепловой поток, вентиляция, системы нагрева

B.V. BORISOV, Dr.Sc. (Phys.-Math.)
A.V. VYATKIN, student,
G.V. KUZNETSOV, Dr. Sc. (Phys.-Math.)
V.I. MAKSIMOV, PhD,
T.A. Nagornova, PhD,
F.Yu. SALIHOV, student

National Research Tomsk Polytechnic University, School of Energy Engineering,
Scientific and educational center I.N. Butakova
634508 Tomsk, St. Lenin, 30-A
E-mail: elf@tpu.ru, amer-salom@hotmail.com

Possibilities of 3D modeling of the processes of heat and mass transfer when heating a room with a gas infrared emitter

Abstract. The results of mathematical 3D modeling of heat transfer processes during the heating of a room by a gas infrared radiator are given, taking into account the operation of the supply and exhaust ventilation, as well as the presence of an element of laboratory equipment and a human figure in the room.

Key words: gas infrared emitter, mixed convection, radiant heat flow, ventilation, heating systems

С целью выявления условий наиболее эффективного использования достоинств систем обогрева помещения на основе газового инфракрасного излучателя (ГИИ) на этапе проектирования проводятся пред-

варительные расчеты процессов тепломассопереноса. Проведение 3D моделирования позволяет предоставить во времени динамику пространственного распределения температур в производственном помещении. То есть дает возможность анализировать температурную комфортность локальных рабочих зон с учетом влияния наличия оборудования (горизонтальная панель) и фигуры работающего в ней человека при совместной работе газового инфракрасного излучателя (ГИИ) светлого типа и системы воздухообмена (рис. 1).

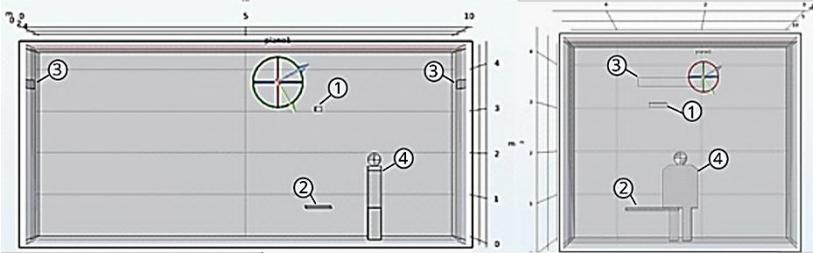


Рис. 1. Схема области 3D моделирования: 1 – ГИИ, 2 – горизонтальная панель, 3 – каналы системы воздухообмена, 4 – фигура работающего

Численное 3D моделирование проводилось методом конечных элементов в рамках модулей «The Heat Transfer in Fluids» и «The Turbulent Flow, k - ϵ Interface» программной среды COMSOL Multiphysics. Параметры радиационного теплового потока определялись модулем «Surface-to-Surface Radiation» [1]. При расчетах полагалось, что температура поступающего вентиляционного потока соответствует начальной в помещении $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход $2,2 \cdot 10^{-4}$ кг/(с·м³) (однократное обновление воздуха в помещении за час).

Наличие человеческой фигуры существенно корректирует поле скоростей в примыкающей к ней области (рис. 2) и оставляет ярко выраженный «след» на температурном поле (рис. 3).



Рис. 2. Векторное поле скоростей в помещении после 1 часа работы ГИИ

Возможности 3D моделирования учесть реальные геометрические особенности поля решения позволяют при сравнительном анализе проверить результаты 2D моделирования.

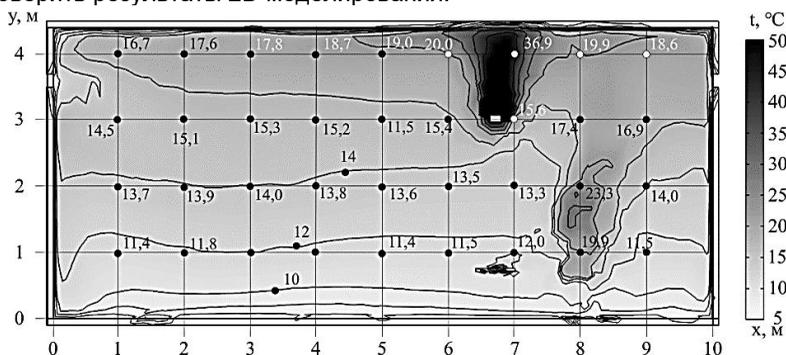


Рис. 3. Температурное поле в продольном сечении помещения, проходящем вертикально через центр излучающей поверхности ГИИ после 1 часа его работы

1. Такой анализ показывает хорошее согласие 2D, 3D моделирования и результатов теплофизических экспериментов.

2. Проведенное исследование дает возможность рекомендовать для практических расчетов совместное использование 0D, 2D моделирование для оценки осредненных температурных параметров по объему комнаты (0D подход) и анализ температурного поля локальных зон (2D подход) с периодической проверкой результатов с помощью физических измерений и 3D моделирования. Проверочные мероприятия рекомендуется проводить перед массовыми расчетами по 0D, 2D методикам. Такой подход обеспечивает и уверенность в достоверности предлагаемых для проектирования результатов расчетов и экономичное расходование временных ресурсов.

Исследование поддержано РНФ №20-19-00226.

Литература

1. Тепловые режимы локальных рабочих зон крупногабаритных помещений при использовании газовых инфракрасных излучателей / А.В. Вяткин, Б.В. Борисов, Г.В. Кузнецов, В.И. Максимов, Т.А. Нагорнова. Новосибирск: СО РАН, 156 с., 2022.

2. B.V. Borisov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova, A.V. Vyatkin. Experimental determination of the air exchange system influence on the thermal conditions of a local working area heated by a gas infrared heater // J. Phys.: Conf. Ser., vol. 2211, article ID 012022, 2022.

3. B.V. Borisov, A.V. Vyatkin, G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov, T.A. Nagornova. Analysis of the influence of the gas infrared heater and equipment element relative positions on industrial premises thermal conditions // Energies, vol. 15, article ID 8749, 2022.

УДК 536.24

Г.Р. БАДРЕТДИНОВА, аспирант,
А.В. ДМИТРИЕВ, д.т.н.

Казанский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
E-mail: nice.badretdinova@mail.ru

Влияние осадка на тепловой поток оребренной трубы

Аннотация. В работе представлено исследование влияния коэффициента теплопроводности осадка λ_o и толщины ребра δ_p на относительный тепловой поток Q и его изменение во времени τ .

Ключевые слова: оребренная труба, осадок, тепловой поток

G.R. BADRETDINOVA, graduate student,
A. V. DMITRIEV, Doctor of Technical Sciences

Kazan State Power University,
420066, Kazan, 51 Krasnoselskaya Str.
E-mail: nice.badretdinova@mail.ru

The effect of sediment on the heat flow of a finned pipe

Abstract. The paper presents a study of the influence of the coefficient of thermal conductivity of the sediment λ_o and the thickness of the fin δ_p on the relative heat flux Q and its change in time τ .

Key words: finned pipe, precipitation, heat flow

Во время эксплуатации теплообменных аппаратов на их поверхности образуются различные виды отложений, снижающие тепловой поток [1]. Загрязнение поверхности теплообмена может возникнуть вследствие осаждения твердых частиц, содержащиеся в парогазовой смеси [2]. Анализ образования загрязнений твердыми частицами на поверхности труб теплообменного аппарата позволит прогнозировать снижение теплового потока во времени, а также определить место расположение форсуночных устройств, с помощью которых возможно удаление слоев осадка путем смывания их водой.

В работе рассмотрена оребренная труба теплообменника, показанная на рис. 1. Цель исследования – определить влияние коэффициента теплопроводности осадка λ_o и толщины ребра δ_p на тепловой поток Q и его изменение во времени τ .

Для исследуемого ребра ранее в работе [3] было получено дифференциальное уравнение для температур

$$\frac{\partial^2 \vartheta(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta(r, \tau)}{\partial r} = \frac{2\lambda_o}{\Lambda} \frac{\vartheta(r, \tau)}{\delta(r, \tau)} \quad (1)$$

и граничные условия для $\vartheta(r, \tau)$

$$\vartheta(r, \tau)|_{r=R_0} = \vartheta_0, \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \Big|_{r=R_D} = 0 \quad (2)$$

где $\vartheta(r, \tau)$ – избыточная температура при координате r в момент времени τ , °C; ϑ_0 – температура осадка, °C; λ_0 – коэффициент теплопроводности, Вт/м²·К; Λ – термическая проводимость ребра, Вт/(м·К) ($\Lambda = \lambda_p \delta_p$, δ_p – толщина, λ_p – теплопроводность ребра); $\delta(r, \tau)$ – толщина слоя осадка при координате r в момент времени τ .



Рис. 1. Трехмерная модель трубы с наружным поперечным оребрением

Уравнение для толщины слоя осадка получено в следующем виде:

$$\frac{\partial \delta(r, \tau)}{\partial \tau} = k \lambda_0 \frac{\vartheta(r, \tau)}{\delta(r, \tau)} \quad (3)$$

и начальные условия для $\delta(r, \tau)$ были взяты как

$$\delta(r, 0) = h_0 = \text{const} > 0, \quad R_0 \leq r \leq R_D \quad (4)$$

где k – коэффициент, выражающийся через концентрацию загрязнения в конденсате, долю загрязнений, оседающих на поверхность, плотность осадка и теплоту конденсации; R_D – диаметр ребра, м; R_0 – диаметр трубы, м.

Вычисления проводились при параметрах, приведенные ниже в табл. 1. Параметры $L=0,013$ м; $\delta_p=1 \cdot 10^{-3}$ м; $\lambda_0=0,3$ Вт/(м²·К); $\lambda_p=30$ Вт/(м²·К) были приняты как базовые, где L – высота ребра, м.

Таблица 1. Расчётные значения

Параметры	Значения		
L	0,003	0,013	0,03
δ_p	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
λ_0	0,037	0,3	0,67
λ_p	12	30	50

В результате исследования были получены графики зависимости изменения относительного теплового потока во времени t при различных коэффициентах теплопроводности осадка λ_o и толщинах ребра δ_p (рис. 2-3). Из рис. 2 видно, что через 30 дней относительный тепловой поток изменится в 3,44 раза, а через 72 дня в 4,77 раза. Из рис. 3 видно, что через 1 день относительный тепловой поток изменится в 1,95 раза, а через 72 дня в 1,57 раза.

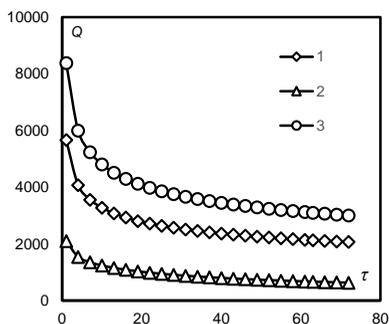


Рис. 2. График зависимости теплового потока Q от времени t при различных значениях коэффициента теплопроводности слоя осадка λ_o

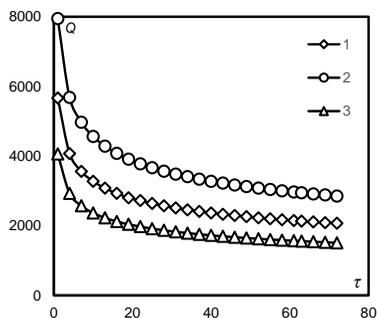


Рис. 3. График зависимости теплового потока Q от времени t при различных значениях толщины ребер δ_p

Вывод. Получена математическая зависимость, позволяющая определить изменения теплового потока в зависимости от времени работы теплообменного аппарата с оребренными трубами.

Литература

1. Галковский В.А., Чупова М. В. Анализ снижения коэффициента теплопередачи теплообменных аппаратов вследствие загрязнения поверхности // Вестник евразийской науки. – 2017. – Т. 9. – №. 2 (39). – С. 61.
2. Якимов Н.Д., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р., Борисова С.Д. Особенности решения задачи о конденсации пара, содержащего твёрдые частицы на ребре // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24. – № 3. – С. 121-129.
3. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Шарипов И.И., Галимова А.Р. Экспериментальное исследование теплообмена от парогазовой смеси при передаче тепла через ребристую поверхность // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Т. 7. № 2 (26). С. 60-74.

УДК 622.692.4

Д.Н. СОЛНЦЕВ, к.т.н.,
А.Н. ПРОНИН, м.н.с.,
А.В. РЯЗАНОВ, м.н.с.,
Д.Д. КУРИЦИН,
Д.С. МАЛЫГИН,
Л.М. СУГЛИЦКАЯ, магистранты

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е.Алексеева,
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д.24.
E-mail: fomius.kisik@gmail.com

Экспериментальные исследования характеристик теплообмена в энергетическом оборудовании с интенсификаторами в условиях образования минеральных отложений

Аннотация. В работе описаны методики исследований и результаты изучения влияния минеральных отложений на теплообменных поверхностях с интенсификаторами энергетического оборудования на характеристики теплообмена и гидравлику.

Ключевые слова. теплообменная поверхность, коэффициент теплоотдачи, минеральные отложения.

D.N.SOLNTSEV, Candidate of Technical Sciences,
A.N.PRONIN, junior researcher,
A.V.RYAZANOV, junior researcher,
D.D. KURITSYN,
D.S. MALYGIN,
L.M. SUGLITSKAYA master program students

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E.Alekseev
603155, Nizhny Novgorod, 24 Minina str.
E-mail: fomius.kisik@gmail.com

Experimental studies of heat transfer characteristics in power equipment with intensifiers under conditions of formation of mineral deposits

Abstract. This work presents a description of the research methodology and the results of studying the influence the process of formation of mineral deposits on the heat - exchange surface with power equipment intensifiers on the characteristics heat - exchange and hydraulics.

Key words: heat - exchange surface, coefficient heat - transfer, mineral deposits

В Российской Федерации эксплуатируется большое количество объектов энергетики, которые используют в качестве теплоносителя воду из открытых водоемов – рек, прудов-охладителей и т.д. При эксплуатации данных объектов на теплообменных поверхностях образу-

ются минеральные отложения, что приводит к снижению тепловой мощности, выходу из строя оборудования и внеплановым ремонтам.

Для повышения эффективности работы энергетического оборудования используют различные методы интенсификации теплообмена [1-3]. Это позволяет обеспечить повышение тепловой мощности. В то же время, остается открытым вопрос эффективности использования интенсификаторов в условиях образования отложений. Для изучения процесса теплообмена в оборудовании в условиях образования минеральных отложений разработан и создан экспериментальный стенд, которая представляет собой контур циркуляции с двумя экспериментальными моделями [4]. Экспериментальные модели выполнены в виде трубопроводов диаметром 42x4 мм. Отличие моделей заключается в том, что в один из трубопроводов устанавливается ленточный завихритель.

В результате проведенных исследований было определено, что установка ленточного завихрителя приводит к росту перепада давления на экспериментальном участке на 10,5%, при этом средние значения расходов по экспериментальным моделям отличаются на величину не более 3%. Применение ленточного завихрителя позволило повысить коэффициент теплоотдачи в экспериментальной модели на 19,8% (рис. 1). Повышение коэффициента теплоотдачи происходит на всех этапах эксплуатации экспериментальной установки – разогреве установки, работе на номинальной мощности и расхолаживании.

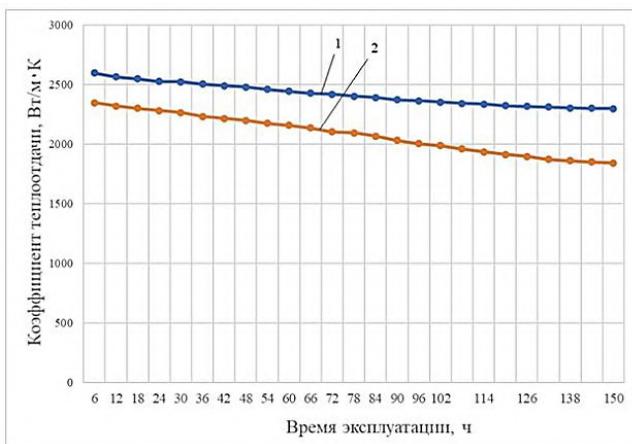


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи в экспериментальной модели от времени эксплуатации:

- 1 – экспериментальный участок с ленточным завихрителем,
- 2 – экспериментальный участок без ленточного завихрителя

При визуальном осмотре экспериментальных моделей после 150 часов эксплуатации было установлено, что количество отложений в трубе с ленточным завихрителем меньше, чем в модели без завихрителя (рис. 2). На экспериментальной модели без завихрителя происходит образование локальных наростов минеральных отложений, которые, очевидно, при дальнейшей работе будут соединяться между собой и образовывать единый слой минеральных отложений.



Рис. 2 - Загрязнения в трубном пространстве экспериментальных моделей:
а – без ленточного завихрителя; б – с ленточным завихрителем.

Выводы: В результате проведенных исследований установлено, что установка ленточных завихрителей интенсифицирует процесс теплообмена, увеличивая коэффициент теплоотдачи. Установка ленточных завихрителей приводит к снижению интенсивности образования минеральных отложений, но при этом повышает гидравлическое сопротивление и требует дополнительных затрат на прокачивание теплоносителя.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2021-0008).

Литература

1. Будов В.М., Дмитриев С.М. Форсированные теплообменники ЯЭУ. - Вып. 40 - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 176 с.
2. Соборнов, А.Е. Оценка эффективности применения ленточных завихрителей в каналах теплообменного оборудования для интенсификации процесса теплоотдачи / А.Е. Соборнов [и др.] // Современные техника и технологии: сб. научных трудов. СТТ-2013: в 8 т. М., 2013. Т. 1. С. 17–27.
3. Кишкин А.А., Краев М.В., Зуев А.А. Интенсификация теплообмена // Авиационная и космическая техника. - 2005. - №3. - С. 130-134.
4. Экспериментальные исследования характеристик теплообмена в энергетическом оборудовании с интенсификаторами в условиях образования минеральных отложений / А. В. Рязанов, М. А. Григорьев, Д. Д. Курицин [и др.]. // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 12. С. 256-259.

УДК 621.45.022.7

А.И. ГУРЬЯНОВ, д.т.н., доцент
О. А. ЕВДОКИМОВ, д.т.н., доцент,
О.В. КОМОВА, аспирант,

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьёва
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д.53
E-mail: crist.timofeewa2011@yandex.ru

Изучение ультрабедных режимов горения многокомпонентного водородосодержащего топлива в противоточном закрученном течении

Аннотация. В работе приведены результаты экспериментальных исследований ультрабедных режимов горения многокомпонентного водородосодержащего топлива в закрученных потоках.

Ключевые слова: водород, горение, закрученный поток, диапазон устойчивого горения.

A.I. GUR'YANOV, Grand PhD in Engineering, Assoc. Prof.
O.A. Evdokimov, Grand PhD in Engineering, Assoc. Prof.,
O.V. KOMOVA, PhD student.

Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University,
152934, Rybinsk, Pushkina, 53
E-mail: olya.comova2015@yandex.ru

Study of ultra-poor combustion modes of multicomponent hydrogen-containing fuel in a countercurrent swirling current

Abstract. The paper presents the results of experimental studies of ultra-poor combustion modes of multicomponent hydrogen-containing fuel in swirling streams.

Key words: hydrogen, burning, swirling flow, range of steady burning.

Одной из основных характеристик камер сгорания является концентрационный диапазон устойчивого горения топливовоздушной смеси, ограниченный пределами срыва фронта пламени в бедной области.

Характерными особенностями горения «бедной» по составу смеси вблизи концентрационной границы срыва пламени является высокая вероятность срыва пламени по тепловому механизму. Проблемой низкоэмиссионных камер сгорания, работающих по «бедной» схеме горения, является однорежимность горелочных модулей с заданным коэффициентом избытка воздуха, значения которого близки к границе диапазона устойчивого горения. На практике решение этой проблемы достигается за счёт организации диффузионно-кинетического горения, при котором неустойчивая «бедная» зона стабилизируется пилотным высокотемпературным факелом. Однако, решение отмеченных про-

блем возможно за счёт применения топлив, обладающих расширенным концентрационным диапазоном устойчивого горения. Это позволит сжигать «бедную» и «ультрабедную» предварительно подготовленную смесь, исключив вероятность теплового срыва фронта пламени [1].

Было проведено исследование влияния добавок многокомпонентного водородсодержащего топлива (МВТ) к метану и организация «ультрабедного» горения их смесей в противоточном горелочном устройстве (ПГУ).

На рис. 1 представлены результаты исследования влияния объёмной доли МВТ и водорода на границу «ультрабедного» срыва пламени.

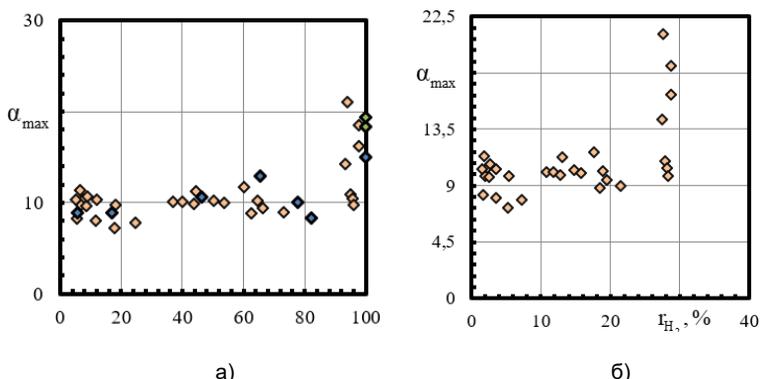


Рис. 1. а) Зависимость концентрационной границы устойчивого горения в «ультрабедной» области от объёмной доли МВТ в топливной смеси;
б) Зависимость концентрационной границы устойчивого горения в «ультрабедной» области от объёмной доли водорода

Анализ данных зависимостей позволяет сделать вывод о значительном качественном и количественном влиянии объёмной доли МВТ и водорода на теплофизику и кинетику горения в ПГУ. Добавка МВТ в диапазоне от 7 % до 80 % сопровождается скачкообразным расширением концентрационного диапазона устойчивого горения в 4 раза в количественном выражении. Это можно объяснить наличием в составе МВТ активных промежуточных компонентов, обусловленных развитием цепного механизма протекания процессов горения. Характерным моментом влияния добавки МВТ на «бедный» срыв пламени является наличие диапазона по объёмной доле МВТ от 80 % до 100 %, в котором происходит нелинейный локальный рост коэффициента избытка воздуха, соответствующий «ультрабедному» срыву с максимальным значением α_{\max} на уровне $18 < \alpha < 19$ при значениях добавки МВТ 100%.

На рисунке 2 приведена зависимость коэффициента избытка воздуха, ограничивающего концентрационный диапазон устойчивого горения в области «ультрабедных» смесей от процентного содержания водорода в составе топливной смеси и её объёмной теплоты сгорания.

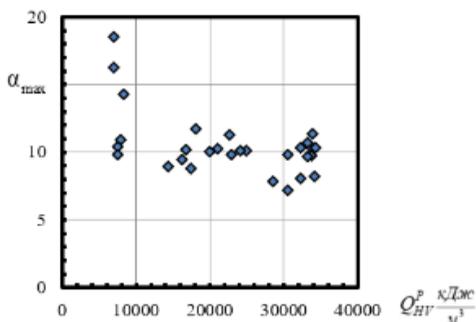


Рис. 2. Зависимость концентрационной границы устойчивого горения топливной смеси в «ультрабедной» области по её составу от объёмной теплоты сгорания

Экспериментальные исследования противоточного горелочного устройства на МВТ подтвердили возможность организации сверхбедного горения, при этом режим горения в ПГУ является устойчивым без пульсаций температуры и возникновения механизмов виброгорения.

Работа выполнена в рамках гранта РФФ 22-29-20220.

Литература

1. Guryanov AI et al., An experimental study of syngas combustion in a bidirectional swirling flow, International Journal of Hydrogen Energy, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.004>

УДК 621.45.022.7

К.Р. НОСКОВА, аспирант,
М.М. ГУРЬЯНОВА, к.т.н., доцент,
А.И. ГУРЬЯНОВ, д.т.н., доцент

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьёва
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д.53
E-mail: crist.timofeewa2011@yandex.ru

Влияние газодинамики компрессора на рабочий процесс в камере сгорания ГТД

Аннотация. В работе приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований в камере сгорания газотурбинного двигателя с учетом влияния газодинамики компрессора.

Ключевые слова: камера сгорания, компрессор, несимметричный профиль скорости.

K.R. NOSKOVA, PhD student,
M.M. GUR'YANOVA, PhD in Engineering, Assoc. Prof.,
A.I. GUR'YANOV, Grand PhD in Engineering, Assoc. Prof.

Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University,
152934, Rybinsk, Pushkina, 53
E-mail: crist.timofeewa2011@yandex.ru

Compressor gas dynamics influence on the working process in gte combustion chamber

Abstract. The paper presents the results of computational and experimental studies in the combustion chamber of a gas turbine engine, taking into account the influence of compressor gas dynamics.

Key words: combustion chamber, compressor, asymmetrical velocity profile.

Известно, что на выходе из компрессора газотурбинных двигателей (ГТД) возникает нестационарность течения вследствие взаимодействия рабочего колеса и спрямляющего аппарат. Это является причиной образования несимметричного профиля скорости на входе в камеру сгорания (КС) [1, 2].

По результатам проведенного численного моделирования ступени центробежного компрессора получено, что эпюра скорости за лопаточным диффузором, а также за спрямляющим аппаратом имеют несимметричность по высоте канала.

Оценка несимметричности профиля скорости за компрессором проводится коэффициентом K , определяемым отношением среднерасходных скоростей потока в верхнем и нижнем полуканалах.

В результате расчетов на выходе из компрессора получена эпюра скорости с коэффициентом $K > 1$ ($K = 1,75$), представленная на рис. 1,а. Дополнительно спроектированы генераторы несимметричности, формирующие на выходе профили скорости со значениями $K = 1$, $K > 1$ и $K < 1$. Полученные эпюры задавались в виде граничных условий на входе в КС.

Первоначально выполнены исследования газодинамики КС полноразмерного ГТД. При симметричной эпюре скорости ($K = 1$) наружный и внутренний кольцевые каналы равномерно заполняются рабочим телом (воздух), равномерное затекание наблюдается и во фронтальном устройстве. В области внезапного расширения образуются зоны обратных токов. Для случая при $K < 1$, расход воздуха преимущественно направлен в нижний кольцевой канал. Интенсивность отрывной зоны в области внезапного расширения возрастает, наблюдается нелобовое столкновение максимального импульса струи с обтекателем. Это приводит к неравномерной подаче воздуха в зону смешения. Вблизи нижней стенки возникает интенсивная вихревая зона и на выходе из КС наблюдаются смещение линий тока и максимум расхода в верхней стенке жаровой трубы.

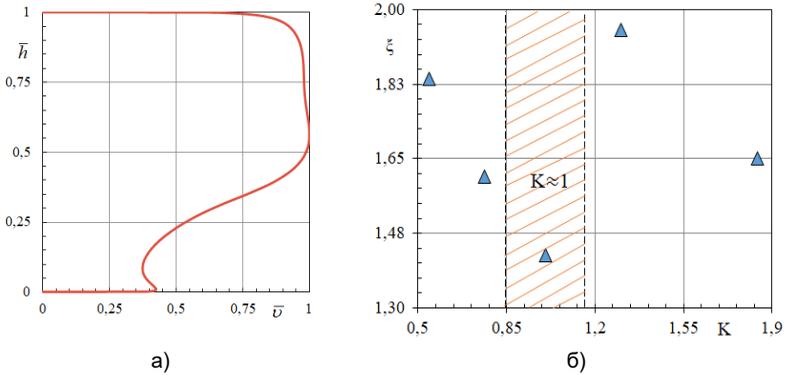


Рис. 1. а) Эпюра скорости за лопаточным диффузором компрессора;
 б) Зависимость коэффициента гидравлических потерь от коэффициента несимметричности профиля скорости в КС МГТД

Проведено численное моделирование в камере малоразмерного газотурбинного двигателя (МГТД). Расчеты выполнены аналогично полноразмерной ГТД, то есть с заданием на входе в КС несимметричной эпюры скорости. Получено, что при $K=1$ основной входящий поток в КС МГТД распределен равномерно вдоль верхнего кольцевого канала, в жаровой трубе заметно меньше вихревых структур. Поэтому в области геометрического поворота стенок равномерное затекание воздуха. Для случаев при $K>1$ и $K<1$ на внутреннем радиусе образуется торoidalная вихревая структура, которая пережимает проточное течение, изменяет угол натекания на лопатки в турбине, т.е. препятствует образованию равномерных линий тока в выходном сечении, как это происходит для $K=1$ (рис. 2).

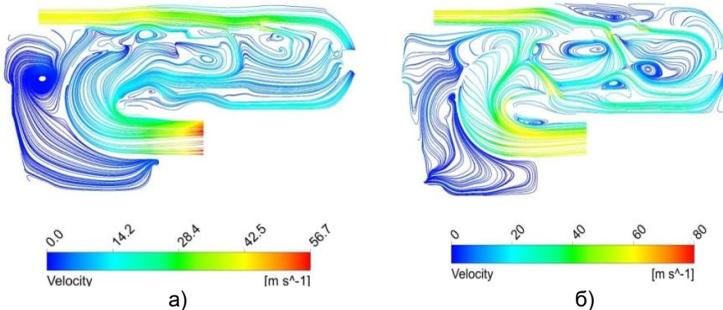


Рис. 2. Структура течения в продольном сечении КС МГТД:
 а) $K=1$; б) $K>1$

Наименьшие значения гидравлических потерь по тракту КС, как для полноразмерного ГТД, так и для МГТД, получены в случаях с симметричной эпюрой скорости на выходе из компрессора. При значениях $K > 1$ и $K < 1$ коэффициент ξ возрастает (рис. 2,б). Следовательно, при проектировании КС важным моментом является сохранение величины несимметричности в диапазоне значений K , близких к 1, что позволяет обеспечить минимум гидравлических потерь.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2023-0002).

Литература

1. Gur'yanova M. M. Joint effect of input asymmetrical velocity profile and initial turbulence intensity on hydraulics of a separated diffuser of GTE combustion chamber / M. M. Gur'yanova, Sh. A. Piralishvili // Russian Aeronautics (Iz.VUZ). 2016. Vol. 59. №2. Pp. 197-205.

2. Gur'yanova M. M. Investigation of the Effect of the Output Parameters of the Flow behind the Compressor on the Gas Dynamics of the Separation Diffuser of the Combustion Chamber / M. M. Guryanova, K. R. Timofeeva, A. I. Guryanov // AIP Publishing. 2020. №2211. Pp. 1-5.

УДК 66.045.122

О.Б. КОЛИБАБА¹, к.т.н.,
Р.Д. АДАКИН²

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина¹,
153003г. Иваново, Рабфаковская, 34
Ярославская государственная сельскохозяйственная академия²,
150042 г. Ярославль, Тутаевское ш., 58,
E-mail: koli-baba@mail.ru¹, adakin@mail.ru²

Численное моделирование работы теплогенератора хлебопекарной печи

Аннотация. В данной статье рассматривается численное трехмерное моделирование работы теплогенератора хлебопекарной печи с целью определения геометрических характеристик дефлекторов, обеспечивающих локальные завихрения теплоносителя, и их эффективной работы.

Ключевые слова: теплообменник, 3d модель, дефлектор, теплогенератор.

О.В. KOLIBABA¹, ph.d.,
R.D. ADAKIN²

Ivanovo State Energy University,¹
Ivanovo, Rabfakovskaya, 34
Yaroslavl State Agricultural Academy,²
E-mail: koli-baba@mail.ru¹, adakin@mail.ru²

Numerical simulation of the operation of the heat generator of the bakery oven

Annotation. This article discusses the optimization of the heat generator of a bakery oven by determining the effective geometric characteristics of deflectors that provide local swirls of the coolant using numerical three-dimensional modeling.

Key words: heat exchanger, 3d model, deflector, heat generator.

Современные теплотехнологические устройства (печи, сушилки и др.) часто проектируют из расчета на возможность использования различных источников энергии. Зачастую, одно и то же устройство может работать на электрической энергии, газе, жидком и твердом топливах. К таким агрегатам можно отнести хлебопекарные печи малой мощности, которые производители часто адаптируют под различные энергоносители для повышения их конкурентных возможностей. Чаще всего для работы на газообразном и жидком топливе в печах используют теплогенераторы, совмещающие в себе камеру сгорания и теплообменное устройство. Теплогенератор представляет из себя комбинацию двухходового трубчатого теплообменника и камеры сгорания в форме трубы, фактически являющейся третьим ходом теплообменника (рис.1).

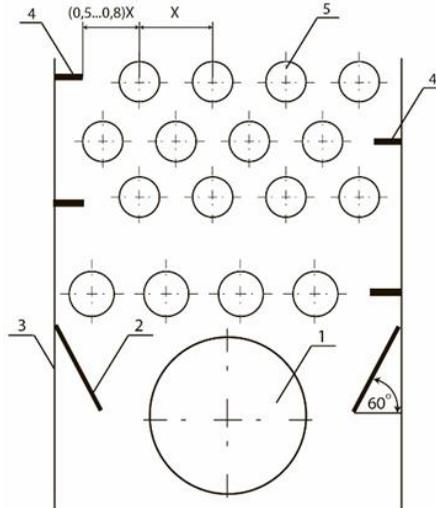


Рис. 1. Схема теплогенератора ротационной хлебопекарной печи:

- 1 – жаровая труба; 2 – наклонный дефлектор; 3 – кожух;
4 – дефлектор боковой; 5 – трубка ТОА

При расчете процессов теплообмена в теплогенераторе может возникнуть ряд трудностей, связанных с тем, что течение является не установившимся, коэффициент теплоотдачи не постоянен по объему, наличие перегородок и дефлекторов вызывает значительные отклонения от идеальной картины течения. В связи с этим, существующие методики расчета

теплообмена содержат в своей основе ряд упрощений [1]. Современное программное обеспечение позволяет решать задачи газодинамики без применения упрощений, выбирая требуемую точность расчетов с помощью моделирования количества узлов и ячеек сетки [2 - 4].

Целью моделирования являлось определение геометрических характеристик дефлекторов теплогенератора ротационной хлебопекарной печи и оценка эффективности их работы.

Моделирование включало в себя: построение геометрической 3D модели, задание граничных условий, получение расчетных данных, модификация геометрических характеристик дефлекторов, повторный расчет и сравнение полученных данных с предыдущими вариантами, выбор наиболее эффективного варианта.

На рис.2 представлена геометрическая модель теплогенератора, а результаты моделирования теплообмена с вынесенными локальными значениями температуры, давления и скорости теплоносителя на рис.3.

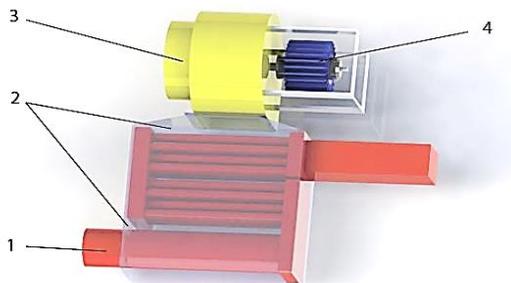


Рис. 2. 3D модель теплогенератора
1 – теплообменный аппарат; 2 – кожух; 3 – радиальный вентилятор;
4 – электродвигатель.

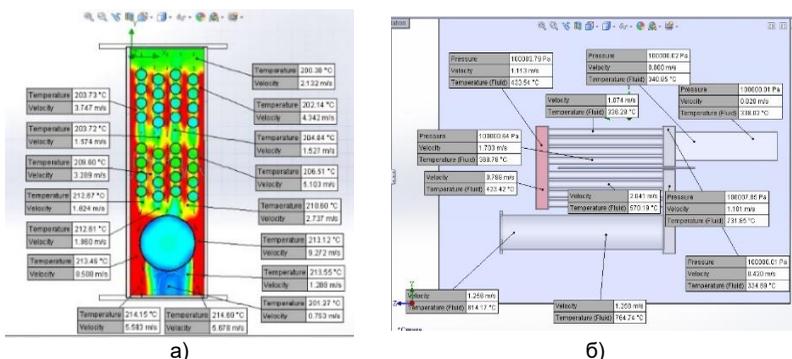


Рис. 3. Модель теплообмена в теплогенераторе: а – разрез; б – вид сбоку.

При моделировании приняты следующие исходные данные. Средняя температура холодного теплоносителя, равная температуре в камере выпечки хлебопекарной печи, составляла 200°C.

Влажность воздуха принимали 0,4 кг/кг (0,4 кг пара на 1 кг сухого воздуха) и 0,04 кг/кг в соответствии с технологией выпечки. В начале цикла выпечки в камеру впрыскивается вода на испаритель, переходит в пар для пароувлажнения хлебной массы с целью получения лучших характеристик продукции.

Скорость обдува теплогенератора изменялась в пределах от 0,5 м/с до 10 м/с с шагом 0,15-0,25 м/с.

Внутри теплогенератора задавали следующие параметры: температуру греющего теплоносителя 830°C, скорость горячего теплоносителя 1,26 м/с, давление $P = 300$ Па. Вытяжной вентилятор на выпуске не установлен.

Параметры горячего теплоносителя в процессе исследования не изменялись. Переменными величинами являлись скорость обдува и влажность воздуха.

На рис. 4 приведены результаты численных экспериментов, обработанные в виде зависимостей числа Нуссельта от числа Рейнольдса.

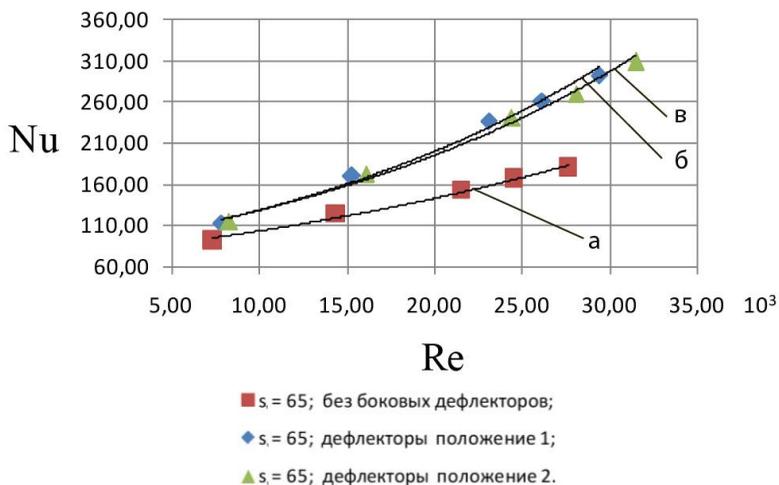


Рис. 4. Графики $Nu=f(Re)$ в зависимости от положения дефлекторов: а) без дефлекторов; б) дефлекторы в положении 1; в) дефлекторы в положении 2

В положении 1 проходное сечение между дефлектором и трубкой составляет $0,8 \cdot d$, а в положении 2 - $0,5 \cdot d$. Положения дефлекторов выбирали опытным путём. При изменении положения дефлектора,

соответственно, изменялось направление потока теплоносителя, что отображалось графически на карте изменения скорости (рис.3). При проведении нескольких экспериментов по моделированию работы теплогенератора, по наибольшим значениям критерия Нуссельта, характеризующим теплоотдачу, были сделаны выводы о наиболее удачном расположении дефлекторов. Использование теплогенератора без дефлекторов сильно снижает теплоотдачу, что наглядно видно на рис.4, кривая а.

Дополнительно были установлены наклонные дефлекторы 2 рис.1, направляющие воздух на камеру сгорания, для более эффективной теплоотдачи. Определен оптимальный угол наклона дефлекторов, который составил 60° .

Из результатов анализа графиков (рис.4) видно, что дефлекторы увеличивают теплоотдачу теплогенератора. Причём дефлекторы с положением 2 показали лучший результат по сравнению с дефлекторами с положением 1. Величина числа Нуссельта увеличивается от 10 до 40 %, а максимальное значение достигает при $Re = 30000$.

Выводы

1. Разработана 3D модель теплогенератора.
2. Проведено численное моделирование газодинамики теплогенератора.
3. Определены геометрические характеристики дефлекторов и углы их наклона.

Литература

1. Справочник по теплообменникам: в 2-х т. Т 2. Энергоатомиздат; ред.: О.Г. Мартыненко. - 1987. - 352 с.
2. Арбатский, А.Н. Повышение эффективности пластинчатых теплоутилизаторов посредством интенсификации теплообмена на поверхностях с овальными лунками: специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Арбатский Андрей Андреевич; науч. рук. В.С. Глазов; Национальный исследовательский университет «МЭИ». – Москва, 2016 – с. 161.
3. Леонтьев А.И., Олимпиев В.В., Дилевская Е.В., Исаев С.А. Существо механизма интенсификации теплообмена на поверхности со сферическими выемками// Известия АН. Энергетика. – 2002. -№2; с. 117-135
4. Анисин, А. А. - Интенсификация теплообмена в каналах сложной формы поперечно обтекаемых трубчатых и пластинчатых поверхностей: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: Анисин, Андрей Александрович 05.14.05. - Санкт-Петербург, 2000. – 132 с.

УДК 621.311.24:621.313.12

В.А. ЙЕ, аспирант,
К.М. АУНГ, аспирант,
И.А. БУРАКОВ, к.т.н.

Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, Красноказарменная улица 14
E-mail: YeVin@mpei.ru; AungKyom@mpei.ru; BurakovIA@mpei.ru

Применение бишофита в качестве тяжёлой среды для обогащения энергетических углей Республики Союз Мьянма

Аннотация. Рассмотрен метод обогащения энергетических углей месторождений Республики Союз Мьянма с применением в качестве тяжёлой среды в сепараторе корытного типа бишофита.

Ключевые слова. Обогащение, уголь, бишофит, сепаратор, технология, эффективность обогащения, извлечение, степени сокращения и концентрирования.

V.A. YE , PhD student,
K.M. AUNG, PhD student,
I.A. BURAKOV, Ph.D.

National Research University «MPEI»,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya street 14
E-mail: YeVin@mpei.ru; AungKyom@mpei.ru; BurakovIA@mpei.ru

The use of bischofite as a heavy medium for the enrichment of energy coals of the Republic of the Union of Myanmar

Abstract. The method of enrichment of energy coals of deposits of the Republic of the Union of Myanmar with the use of bischofite as a heavy medium in a trough-type separator is considered.

Key words. Enrichment, coal, bischofite, separator, technology, enrichment efficiency, extraction, degrees of reduction and concentration.

Наиболее широко применимыми в промышленности методами обогащения углей являются гравитационные методы, одной из разновидностей которых является обогащение с использованием тяжёлосредних сепараторов. При применении данных методов разделение горючей органической части топлива (концентрата угля, ценной породы) и негорючей части топлива (пустой породы, отходов, хвостов) осуществляется по показателю плотности тяжёлой среды [1]. В качестве тяжёлой среды в промышленности для обогащения углей используют жидкую водно-утяжелённую среду (суспензии), где в качестве частиц-утяжелителей применяют измельчённые частицы магнетита, кварцевого песка, глины, сланцевых пород, лесса, барита, пирита [2]. Применение минеральных суспензий влечёт за собой следующие проблемы:

трудности при приготовлении суспензий; потребность в постоянной гомогенизации и обновлении используемых суспензий при эксплуатации в рабочей зоне; наличие уноса частиц-утяжелителей в обогащённый уголь (в концентрат угля). Решением вышеперечисленных проблем (или части вышеперечисленных проблем) является применение в качестве тяжёлой среды однородных (однофазных) жидкостей с повышенной плотностью. Известны работы, связанные с оценкой возможности применения в качестве тяжёлой среды однородных органических и минеральных жидкостей, таких как: трихлорэтан C_2HCl_3 , четырёххлористый углерод CCl_4 , пятихлорэтан C_2HCl_5 , дибромэтан $C_2H_4Br_2$, бромформ C_2HBr_3 , ацетилентетрабромид $C_2H_2Br_4$, трихлорфторметан $CFCl_3$, хлористый кальций $CaCl_2$, хлористый цинк $ZnCl_2$, йодистая ртуть HgI_2 , йодистый калий KI_2 [2]. Применение вышеперечисленных жидкостей в промышленности носит ограниченный характер по причинам: высокой стоимости, токсичности, трудности в проведении регенерации тяжёлой среды [2]. В лабораториях НИУ «МЭИ» на кафедрах ТОТ и ТЭС были проведены исследования на возможность применения в качестве тяжёлой среды в гравитационных сепараторах корытного типа подземных хлоридных натриевых рассолов природного происхождения [3], которые также в рамках функционирования ТЭС применяются для регенерации Na-катионитных фильтров [3]. В качестве тяжёлой среды исследовались природные подземные хлоридные натриевые рассолы плотностями 1160 и 1165 кг/м³. По результатам исследований в рамках обогащения углей месторождений Республики Союз Мьянма показатели эффективности обогащения варьировались от 26,92% до 43,95% – для углей месторождения Тигиит; от 27,26% до 35,62% – для углей месторождения Калева; от 37,13 до 64,27% – для углей месторождения Чжо Сейн в зависимости от класса крупности исходного угля [3]. Полученные значения эффективности процессов обогащения углей месторождений Тигиит и Калева с применением в качестве тяжёлой среды природных подземных хлоридных натриевых рассолов по существующей классификации [1, 2] относятся к группе приемлемых для обогащения процессов (значения эффективности варьируются от 25% до 50%). И лишь часть изученных процессов обогащения углей месторождения Чжо Сейн могут характеризоваться, как эффективные процессы обогащения (значения эффективности более 50%) [3].

Для обеспечения требуемой «глубины обогащения» (значений зольности концентрата на сухую массу обогащённого угля) и требуемой эффективности процессов обогащения следует подобрать новый тип тяжёлой среды с большей (по сравнению с природными подземными хлоридными натриевыми рассолами) плотностью и с условием наличия месторождений либо производства на территории Республики Союз Мьянма. В рамках решения поставленной выше задачи было предло-

жено применение в качестве новой тяжёлой среды растворов бишофита ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) (в зависимости от марки плотность их имеет значения: марка «А» – 1300 кг/м^3 ; марка «Б» – 1200 кг/м^3). В лабораториях кафедр ТЭС и ТОТ НИУ «МЭИ» автором был выполнен комплекс лабораторных и теоретических исследований, направленных на: изучение возможности применения в качестве тяжёлой среды в гравитационных сепараторах корытного типа растворов бишофита для обогащения углей месторождений Республики Союз Мьянма.

По результатам экспериментальной работы разработан метод обогащения углей Республики Союз Мьянма с применением в качестве тяжёлой среды бишофита марок «А» и «Б» в сепараторе корытного типа. Применение бишофита в качестве тяжёлой среды обеспечивает эффективность процессов обогащения угля в диапазоне от 33,79 до 63,36%, упрощает эксплуатацию тяжёлосредных сепараторов, обеспечивает отсутствие потребности в гомогенизации тяжёлой среды, обеспечивает увеличение теплоты сгорания в концентрате обогащённого угля в 1,03–1,13 раз, сокращает образование золошлаковых отходов в 2,13–5,19 раза по сравнению с использованием исходного угля. Оптимальным размером исходного угля для процесса обогащения является размер менее 0,315 мм.

Литература

1. В.М. Авдохин. Обогащение углей / учебник для вузов в 2 т. – М.: Издательство «Горная книга» // 2012. Т. №1. «Процессы и машины» – 424 с.
2. М.С. Клейн. Технология обогащения углей, учеб. пособие [Электронный ресурс]: для студентов специальности 130405 «Обогащение полезных ископаемых» / М. С. Клейн., Т.Е. Вахонина // – Электрон.дан. – Кемерово: КузГТУ, 2011 128 с.
3. И.А. Бураков. Оценка возможности применения подземных природных хлоридных натриевых рассолов в рамках реализации процессов гравитационного обогащения энергетических углей Республики Союз Мьянма / И.А. Бураков., А.Ю. Бураков., И.С. Никитина., Аунг Х.Н., Аунг К.М. // Энергосбережение и Водоподготовка № 6 (134), 2021, с. 4 – 9.

УДК 621.311.24:621.313.12

А.Ю. БУРАКОВ¹, к.г.-м.н.,
И.А. БУРАКОВ², к.т.н.,
И.С. НИКИТИНА², к.т.н.

¹Общество с ограниченной ответственностью «Геоминвод»,
117208, г. Москва, ул. Сумская, д.8, к.2
E-mail: andburakov@mail.ru

²Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, Красноказарменная улица 14
E-mail: BurakovIA@mpei.ru; NikitinaIS@mpei.ru

Особенности эксплуатации рассолодобывающих скважин, используемых для целей регенерации натрий- катионитных фильтров

Аннотация. Рассмотрена технология эксплуатации скважин, предназначенных для добычи природных подземных хлоридных натриевых рассолов, используемых в качестве основы для эксплуатации Na-катионитных фильтров.

Ключевые слова. Природные подземные хлоридные натриевые рассолы, скважины, натрий-катионитные фильтры, регенерация, эксплуатация.

A.Y. BURAKOV¹, Ph.D.,
I.A. BURAKOV², Ph.D.,
I.S. NIKITINA², Ph.D.

¹Limited Liability Company "Geominvod",
117208, Moscow, Sumskaia str., 8, building 2
E-mail: andburakov@mail.ru

²National Research University «MPEI»,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya Street 14
E-mail: BurakovIA@mpei.ru; NikitinaIS@mpei.ru

Features of operation of desalting wells used for the purpose of regeneration of sodium-cationite filters

Abstract. The technology of operation of wells intended for the extraction of natural underground sodium chloride brines used as the basis for the operation of Na-cationite filters is considered.

Key words. Natural underground sodium chloride brines, wells, sodium-cationite filters, regeneration, operation.

На теплоэлектростанциях ПАО «Мосэнерго» начиная с 1979 года началось бурение рассолодобывающих скважин с целью добычи подземных хлоридных натриевых рассолов для регенерации Na-катионитовых фильтров. В настоящее время эксплуатация рассолодобывающих скважин происходит на 13 теплоэлектростанциях ПАО «Мосэнерго» [1].

В результате многолетних исследований сотрудников ПАО «Мосэнерго», ОАО «Фирма ОРГРЭС», НИУ «МЭИ» были установлены кондиции для подземных природных хлоридных натриевых рассолов по возможности использования в качестве регенерационных рассолов, которые заключаются в следующем: величина общей минерализации рассолов должна быть не менее 165 г/дм^3 ; величина соотношения содержания натрия в рассоле (в мг-экв/дм³) к величине общей жесткости рассола (в мг-экв/дм³) должна быть не менее 3,5; для исключения усиления противоионного эффекта величина общей жесткости рассола не должна превышать значения 500 мг-экв/дм^3 при общей минерализации $100\text{--}150 \text{ г/дм}^3$, и не должна превышать значения 1500 мг-экв/дм^3 при общей минерализации $250\text{--}300 \text{ г/дм}^3$ [2].

Прежде всего скважина должна быть оборудована комплексом контрольно-измерительной аппаратуры, обеспечивающей качественное проведение режимных наблюдений, контроль за отбором и расходом рассолов. Контрольно-измерительный комплекс включает в себя: уровнемер, расходомер (ротаметр), термометр. Кроме того, оголовок скважины оборудуется манометром и краном для отбора проб рассола. Все показания приборов записываются в журнал эксплуатации скважины ежесуточно: время пуска и остановки насосного агрегата, показания расходомера, уровнемера, манометра и термометра. Показания уровнемера записываются также и перед каждым пуском и остановкой насоса. На основании этих данных можно сделать вывод о техническом состоянии скважины и электропогружного насосного агрегата. Режим отбора рассолов из скважины может быть непрерывным - круглосуточным или прерывистым. Прерывистая эксплуатация допускается лишь в тех случаях, когда она не вызывает каких-либо изменений в химическом составе и физических свойствах рассола, не может отрицательно повлиять на техническое состояние эксплуатационных скважин и насосного оборудования, а также на рациональные условия разработки месторождения. Опыт эксплуатации рассолодобычных скважин в ПАО «Мосэнерго» свидетельствует о том, что при прерывистом режиме эксплуатации продолжительность работы насоса снижается в 3-4 раза по сравнению с круглосуточным. Опыт обследования скважин свидетельствует о том, что аварии (прекращение подачи рассола) на скважинах в 90% случаев происходят в результате выхода из строя насосных агрегатов. Поэтому одна из основных задач при эксплуатации скважины - диагностика технического состояния насосных установок. Звук при работе установки должен быть равномерным и монотонным. Вибрация практически не ощущается. Механический износ рабочих колес можно обнаружить следующим образом: набрать в чистое ведро рассол из скважины; подождать несколько минут пока закончится газовыделение и рассол станет прозрачным; при хорошем освещении осмотреть поверхность рассола. В том случае, если происходит истирание рабочих колес насоса, на поверхности рассола будут плавать мелкие чешуйки пластмассы.

Пуск в эксплуатацию электропогружного насосного агрегата любого типа, при отсутствии противодействия (отсутствии обратного клапана между рассолоподъемными трубами и насосом), должен производиться только при закрытой задвижке. Насосный агрегат следует выключить и демонтировать для ремонта или замены при увеличении силы тока на 20-25% от номинального при неизменном режиме работы и нормальном напряжении, а также при снижении напора и производительности насосной установки на 20-25% от первоначальной и при появлении сильной вибрации. При появлении в откачиваемом рассоле песка или глинистых частиц, необходимо попытаться прекратить пескование, уменьшив расход рассола с помощью задвижки на напорном трубопроводе. Останавливать насос в этом случае нельзя! Так как частицы породы и кристаллы соли будут осаждаться в проточной части насоса, что приведет к его порче. Насос можно выключить только тогда, когда он будет качать чистый рассол.

Диагностика технического состояния рассолодобычной скважины и электропогружного насосного агрегата не занимает много времени, но позволяет заранее подготовиться к проведению ремонтных работ в скважине, а также замене или ремонту электропогружного насосного агрегата. Кроме того, эти мероприятия позволят увеличить срок службы электропогружного насосного агрегата, продлить срока эксплуатации скважины и повысить надёжность обеспечения хлоридными натриевыми рассолами процесса регенерации натрий-катионитовых фильтров.

Литература

1. Бураков А.Ю. Бромные хлоридные натриевые рассолы Московской области (распространение и условия формирования). - М: МГГУ, 2002. – 149 с.

2. Бураков А.Ю., Бураков И.А. Возможность использования подземных хлоридных натриевых рассолов на территории ЦФО для повышения эффективности энергетического оборудования ТЭС. - Материалы международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики». 9-11 октября 2017 г. Т. 2. М: Издательский дом МЭИ, 2017, С. 184-186.

УДК 697.973, 62-408.8

М.С.СИНЬБУХОВА, студент,
Н.М. САВЧЕНКОВА, к.т.н.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14, стр. 1
E-mail: SinbukhovaMS@mpei.ru, savchenkovanm@mpei.ru

3d моделирование пористых структур для тепловых труб

Аннотация: В работе представлено описание существующих форм упорядоченных пористых структур тепловых труб и сравнение их характеристик.

Ключевые слова: тепловые трубы, пористые структуры, кривизна, проницаемость.

M.S. SINBUKHOVA, student
N.M. SAVCHENKOVA, Ph.D

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st.114, 1
E-mail: SinbukhovaMS@mpei.ru, savchenkovanm@mpei.ru

3D Modeling of porous structures for heat pipes

Abstract: The paper presents a description of the existing forms of ordered porous structures of heat pipes and a comparison of their characteristics.

Key words: heat pipes, porous structures, tortuosity, permeability

Важная часть тепловой трубы – это пористая среда, которая выполняет следующие задачи: обеспечение достаточной разницы капиллярных давлений для обратного потока конденсированной жидкости в испаритель и обеспечение повышенного тепло- и массообмена за счет более высокого отношения площади поверхности к объему и эффекту диспергирования теплоносителя.

Чаще всего встречаются такие формы упорядоченных пористых структур, как Алмаз, I-WP, Примитивная и Гироидная. Ниже будут рассмотрены эти формы (рис. 1).

Алмаз. Кривизна поверхности – геометрическая характеристика пористых сред, которая количественно определяет прямолинейность канала для жидкости, образованного соединяющимися порами. При отсутствии каких-либо препятствий это значение для канала должно быть равно единице, однако в случае пористой среды Алмаз, величина принимает значение 1.325.

Важнейшие свойства текучести пористой среды - проницаемость и коэффициент инерционного сопротивления. Для этого можно провести сравнение с помощью числа Дарси (безразмерной проницаемости). Данный тип уступает решетке I-WP и имеет большее значение проницаемости. Стоит отметить, что меньшее значение проницаемости указывает на более высокое вязкостное сопротивление, а более высокое

значение коэффициента инерционного сопротивления указывает на более высокое сопротивление форме (или инерции).

Существенное значение имеет максимальное значение скорости и градиента давления для массового расхода потока. Здесь Алмаз уступает только решетке I-WP и при этом опережает все оставшиеся варианты.

При сравнении падения давления отклонение от линейной модели (или модели Дарси) составляет менее 20%, что значительно меньше других структур.

Траектория движения жидкости для Алмаза – это извилистая линия. Имеет относительно низкое значение максимальной скорости пор. [1]

I-WP. Для данной формы характерно значение кривизны 1.051. Также она имеет минимальное число Дарси. Таким образом, обеспечивается более высокая вязкость и меньшее сопротивление инерции.

Существует следующая зависимость: перепад давления монотонно увеличивается с увеличением массового расхода для всех решеток. Однако в данном варианте присутствует самое высокое падение давление, которое обеспечивает максимальное сопротивление потоку.

Максимальное отклонение от линейной модели составляет 30%.

Траектория потока представляет собой комбинацию прямых и спиральных линий. Имеет относительно других вариантов малую величину максимальной скорости прохождения жидкости через поры.

Примитивная. Имеет показатель кривизны в проточном канале - 1.033, что является минимальным значением, по сравнению с остальными вариантами.

По проницаемости соизмеримо с решеткой Алмаз. Принимает максимальное значение числа Дарси и, следовательно, минимальный коэффициент инерционного сопротивления. По максимальному значению скорости и градиента давления следует по показателям за первым вариантом.

Наибольшее отклонение от модели Дарси составляет порядка 40%.

Обнаружено, что путь потока является прямой линией. Прямолинейность траектории движения жидкости указывает на меньшее снижение максимальной скорости прохождения жидкости через поры.

Гироидная. Значение кривизны равно 1.256. По показателю числа Дарси является полной противоположностью решетки I-WP, что способствует большему сопротивлению инерции и меньшему вязкостному сопротивлению.

Имеет самое низкое падение давления и, соответственно, низкое сопротивление потоку. Свойственно наибольшее относительно всех предыдущих форм пористых структур процентное отклонение от модели Дарси – более 60%.

Траектории движения жидкости соответствуют спиральным линиям. Кроме того, имеет относительно низкий показатель максимальной скорости прохождения жидкости через поры [2].

Упорядоченная пористая структура позволяет избежать неравномерности теплообмена, так как состоит из множества одинаковых элементов, которые возможно рассчитать точно, не прибегая к экспе-

риментальному определению свойств. Зная достоверно параметры на каждом отдельном участке, надежность работы устройства повышается, а затраты на изготовление снижаются. Печать пористой металлической структуры тепловой трубы позволит придать ей предсказуемые необходимые свойства.

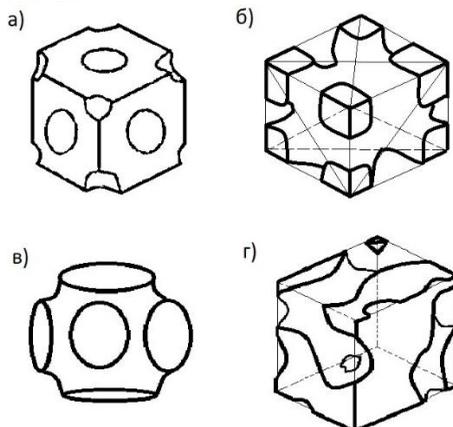


Рис. 1. Формы: а – Алмаз , б - I-WP , в – Примитивная, г – Гироидная.

Литература

1. Flow Characterization in Triply Periodic Minimal Surface (TPMS)-Based Porous Geometries: Part 1—Hydrodynamics, Surendra Singh Rathore, Balkrishna Mehta, Pradeep Kumar, Mohammad Asfer
2. H. Dong and M. J. Blunt, "Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images," Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys., vol. 80, no. 3, pp. 1–11, 2009, doi: 10.1103/PhysRevE.80.036307.

УДК 693.547:624.131

Ч.А. КАДЫРОВ¹ к.т.н.,
А.А. КОБЗЕВА² аспирант,
В.Д. МИТЯЕВ² студент,
В.С. ГЛАЗОВ² к.т.н.

¹Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова
720044, Кыргызстан, г.Бишкек, пр.Ч.Айтматова 66

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250 г. Москва, Красноказарменная, д. 14, стр. 1.
E-mail: chk_66@mail.ru, mamurik@bk.ru

Энергопотребление городом с учетом направления его расширения и изменения климата

Аннотация. Представлена оценка влияния локального потепления на требуемые теплотехнические характеристики отопительных приборов, оснащенных

вертикальным оребрением, и наружных теплозащитных ограждений здания, расположенного в городе Бишкек Кыргызской Республики.

Ключевые слова: климат, эффективность, теплообмен, локальное потепление.

Ch.A. KADYROV¹ Ph.D,
A.A. KOBZEVA² graduate student,
V.D. MITYAEV² student,
V.S. GLAZOV² Ph.D

¹Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov,
66 Ch.Aitmatov Ave., Bishkek, 720044, Kyrgyzstan

²National Research University "MEI",
111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14, p. 1.
E-mail: chk_66@mail.ru, mamurik@bk.ru

Energy consumption of the city in considering the direction of its expansion and climate change

Annotation. An assessment of the effect of local warming on the required thermotechnical characteristics of heating devices equipped with vertical fins and external thermal protection fences of the building located in the city of Bishkek, Kyrgyz Republic is presented.

Key words: climate, efficiency, heat transfer, local warming.

Введение.

Метеорологические данные за последние годы свидетельствуют о повышении температуры воздуха в Центральной Азии. Так, за последние 100 лет, на территории Кыргызстана наблюдался повсеместный рост средней годовой температуры приземного воздуха на 0,28°C каждые 10 лет. Изменение температуры воздуха в Кыргызстане имеет территориальные и сезонные особенности. Места наибольшего роста температуры (0,4°C/10 лет) расположены в районах крупных городов Бишкек, Жалал-Абад и Ош, что может быть обусловлено не только процессом потепления климата, а и наличием явления «кострова тепла», которое проявляется в следствии тепловых выбросов энергетики (до 70 % сжигаемого топлива отапливает атмосферу), промышленных, транспортных и бытовых тепловых загрязнений, пониженного испарения в результате недостатка зеленых насаждений и канализации стока осадков, а также энергетического эффекта городской застройки. Например, согласно данным [1] разница температуры воздуха в центре и на окраинах города Бишкек составляет 2–3 °C летом и 2–4 °C зимой (рис.1). Причина такой разности в плотности городской застройки, которая снижается от центра к окраинам, в парках и скверах, расположенных в основном на окраинах города, а также расположением ТЭЦ в центре Бишкека. Ясно, что отмеченное изменение температуры необходимо учитывать при проектировании зданий, создании систем, обеспечивающих комфортные условия для людей и установок, реализую-

щих тот или иной теплотехнологический процесс. Важность учета данного явления, обусловлена еще и тем, что существующие цены и тарифы на тепловую энергию не учитывают в полной мере процесс потепления и не покрывают затраты многих отечественных энергокомпаний, что приводит к их убыточности [2]. Поэтому поиск ответа на вопрос: «Как отражается процесс потепления и явление «острова тепла» на теплотехнические характеристики теплозащитной оболочки зданий и элементов системы отопления, обеспечивающих требуемый комфорт в помещениях зданий?» является важным для принятия обоснованных энергосберегающих решений.



Рис. 1. Изменение среднегодовой температуры в г. Бишкек в период 1925–2022 гг.

Задачи работы

- Выявить тенденцию изменения климата в районе города Бишкек по данным метеостанций за период с 1925 г. по 2022 г., а также СНиП действующих в период 1982-2013 гг. [1–11].

- Установить, как согласуется расширение г. Бишкек по сторонам света с учетом розы ветров, их температурой и рельефом местности, на которой расположен полуторамиллионный город.

- Определить учтен ли процесс потепления климата и явление «острова тепла» на величину требуемого сопротивления наружного ограждения (НО) для зданий и сооружений, спроектированных по нормативным документам [9, 11], актуальным в период изменяющегося климата.

- Оценить влияние изменения параметров наружного воздуха на массогабаритные и теплотехнические характеристики отопительных приборов, предназначенных для поддержания требуемых условий в помещениях.

Анализ климата в г. Бишкек

Город Бишкек является столицей Кыргызской Республики, представляет собой типичный крупный город-миллионник Центральной Азии, который расположен на подгорной равнине северного Тянь-Шаня.

Анализ изменения климата был выполнен по данным метеостанции (МС) Бишкек, расположенной на высоте 756 м, за период с 1925 по 2022 г.

На рис. 1 представлено изменение средних годовых температур воздуха, полученных по их среднемесячным значениям [1]. Это позволило выявить тенденцию изменения температуры за последние 97 лет. Установлено, что в различных временных интервалах темпы роста температуры не одинаковы. Величина «нормативного» значения годовой температуры воздуха (среднего значения за 30 лет) значительно увеличивается каждые 30 лет. Так за периоды 1931-1960 гг., 1961-1990 гг. и 1991-2021 гг. изменение составило 10°C, 10,8°C и 12,9°C, соответственно (табл. 1).

Таблица 1. Данные из архива МС Бишкек за период с 1925 по 2022 г.

Годы	1925-1935	1936-1946	1947-1956	1957-1966	1967-1976	1977-1986	1987-1996	1997-2006	2007-2016	2017-2022
T, °C	9,9	10,43	9,84	10,4	10,24	10,91	10,82	11,80	11,92	12,9

В «Первом и Втором Национальных сообщениях Кыргызской Республики Рамочной Конвенции ООН по изменению климата» был представлен прогноз по изменению климата в стране, опирающийся на различные модели. В этом сообщении были представлены следующие сценарии изменения климата:

1. На период 2050-2100 гг. по сравнению с базовым периодом 1961–1990 гг. прогнозируемое изменение температуры составит 3 °C;

2. По другим моделям в 2100 году в Кыргызстане ожидается повышение температуры на 6.1 °C [2].

Общая циркуляция атмосферы над Кыргызстаном в основном определяется западным переносом воздушных масс. Особенно сильное ее влияние на ветра прослеживается весной и летом при прохождении атмосферных фронтов, когда наблюдается увеличение скоростей

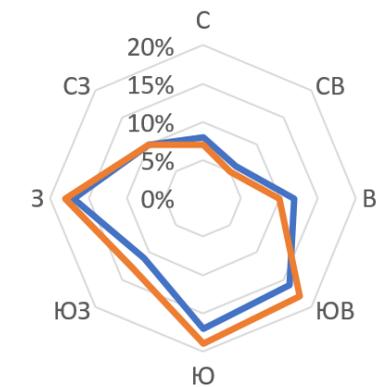


Рис 2. Розы ветров по месяцам года в г. Бишкек:

— 1936 -1980 гг.,
— 1989–1991 гг.

ветра, а в направлениях преобладают Ю, ЮВ, З, В румбы (рис 2.)

На рис. 2 сравниваются розы ветров в Чуйский долине и ее горном обрамлении за периоды 1936–1980 гг. и 1989–1991 гг. для МС Бишкек [5,6]. В табл. 2 приведена повторяемость направлений ветра по месяцам и за 2021–2022 гг., а на рис. 3 в качестве примера представлены розы направления ветра для разных периодов.

Таблица 2. Повторяемость направлений ветра (%) в Чуйской долине и г. Бишкек

Месяц	Повторяемость направлений ветра, (%), 2021 – 2022 гг.							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
1	4	3,5	5,3	17,6	41,9	13,7	10,1	4
2	3,2	6	3,7	11,5	52,5	10,1	8,8	4,1
3	2,2	7,8	7,8	14,7	27,3	17,3	17,3	5,6
4	8,3	5,7	2,6	10	39,6	10,9	12,2	10,9
5	10,9	5,4	5	4,2	31,4	9,6	18	15,5
6	11,1	6,4	2,1	8,1	38,9	9,8	11,1	12,4
7	10,4	4,6	2,1	6,2	34	12,9	8,3	21,6
8	11,5	2,6	0,4	5,6	29,1	18,4	11,1	21,4
9	16,5	3,4	0	9,3	33,1	11	8,9	17,8
10	7,3	6,8	8,1	25,6	20,1	11,1	7,7	13,2
11	2,1	9	13,7	24,4	19,2	10,3	14,5	6,8
12	5,9	3,6	4,1	18	25,7	22,1	12,2	8,6
год	8	5,4	4,58	12,93	32,73	13,10	11,68	12

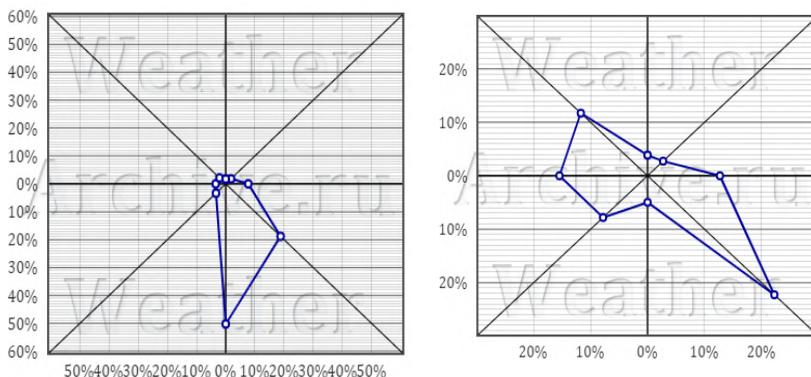


Рис. 3. Роза ветров в г. Бишкек в январе 2021 г. (а) и в марте 2023 г. (б)

Из рис. 3 видно, что в разные периоды преобладающее направление ветра – это Юг и Юго-Восточное. Анализ причин локального потепления показал, что на него могут влиять такие факторы как изменение ландшафта местности, урбанизация и направление расширения территории города. Плотность же расположения метеостанций, способна отразить реальное изменение климата. Мы полагаем, что основными факторами, повлиявшие на локальное потепление являются урбанизация и расширение города в юго-западном направлении, а также преоб-

ладающая ориентация его асфальтированных улиц (рис. 4). Здравый смысл подсказывает, что, если есть потепление, то не нужно увеличивать термическое сопротивление наружного ограждения зданий, и поэтому можно сэкономить на строительных материалах. Более того,



Рис. 4.Расширение территории г. Бишкек

потепление сокращает продолжительность отопительного периода, а значит способствует снижению энергопотребления, необходимо для комфорта. Фактически, с вводом ГСОП была заложена возможность учета изменения климата через продолжительность отопительного периода и расчетную температуру наружного воздуха. Последняя, как показали наши исследования, зависит от направления расширения терри-

Требуемое сопротивление наружного ограждения жилого здания с учётом локального потепления

Теплотехнический расчет был выполнен для 3-х этажного жилого здания, представленного на рис. 5

Исследование изменения температуры в зоне нахождения здания в период 2002 - 2022 г., подтвердило тенденцию к потеплению. Следовательно, рассчитанные по действующим нормативным документам параметры теплозащитной оболочки могут быть избыточными для рассматриваемого объекта. Чтобы убедиться в этом, расчет был проведен по нескольким нормативным документам: по [7,9,10], действующему на момент возведения здания и по актуальному [11] на данный момент. Кроме того, при выполнении теплотехнического расчета были использованы данные по температуре и времени отопительного периода за 2022 г.

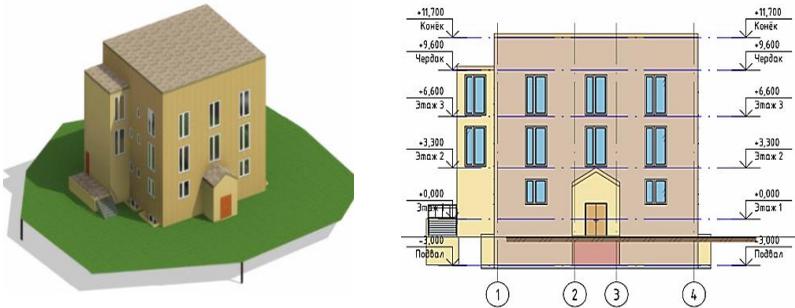


Рис. 5 - Фасад жилого дома и его 3D-модель с цоколем

Таблица 3. Сопrotивления теплопередачи и удельные тепловые потери, согласно [16] и СНиП, актуальных в 1982, 2002, 2013 гг.

Годы	Z, сут	T _{хп} , °C	ΔT, °C	R _Σ (м ² ·°C)/Вт	q, Вт/м ²
1982	157	-27	48	4,41	10,89
2002	157	-23	44	4,04	9,98
2013	150	-19	40	3,67	9,07
2022	133	-16	37	3,4	8,39

Из результатов выполненного расчета (табл. 3 и 4) следует, что учет процесса потепления позволяет, не увеличивая величину удельных тепловых потерь, через теплозащитную оболочку здания, сократить толщину теплоизоляционного материала на 30% по сравнению с требованием СНиП 1999 год.

Таблица 4. Расчетные параметры утеплителя

Величина	Годы			
	1982	2002	2013	2022
ΔR _{изл} (м ² ·°C)/Вт	3,45	3,1	2,74	2,48
δ, м	0,13	0,12	0,10	0,9

Влияние потепления на характеристики отопительного прибора

Для того, чтобы обеспечить высокую теплоотдачу отопительного прибора, имеющего, например, вертикальное оребрение [13-16], необходимо определить оптимальные геометрические параметры его ребер при известной их массе и температуре в основании. В ходе моделирования теплообмена между одиночным прямоугольным ребром и омывающим его воздухом выяснилось, что:

- при неизменном коэффициенте теплоотдачи максимально возможный тепловой поток соответствует одной и той же высоте ребра не зависимо от температуры его основания, но уменьшается с её снижением;

- изменение коэффициента теплоотдачи приводит к необходимости менять геометрические параметры ребер в отопительном приборе, а значит и к изменению его конструктивных характеристик;

- снижение коэффициента теплоотдачи приводит к увеличению оптимальной высоты ребра и его температуры, а вот уменьшение металлоемкости ребра приводит к снижению оптимальной высоты ребра и к изменению конструкции отопительного прибор.

Вывод. Установлено локальное потепление климата в районе расположения г. Бишкек, вызванное интенсивной урбанизацией, расширением городской территории в направлениях, обусловленных рельефом местности и розой ветров. Кроме того, неравномерное распределение расчетной температуры наружного воздуха по территории города способно сказаться на выборе теплозащитного ограждения зданий и на теплотехнических характеристиках отопительной системы, что может привести к разному энергопотреблению зданиями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, гос. задание № FSWF-2023-0017.

Литература

1. www.pogodaiklimat.ru
2. Изменение климата Кыргызстана / Абдырасулова Н.А., Подрезов О.А. и др. Бишкек: ОсОО «Эдем-принт, 2011. – 79 с.
3. www.msn.com
4. Ельникова Е.Е., Кобзева А.А., Глазов В.С. Об энергосберегающих мероприятиях, обеспечивающих требуемый тепловой комфорт в зданиях, расположенных в зоне локального потепления / Энергосбережение – теория и практика: Труды Одиннадцатой Всероссийской конференции с Международным участием «Энергосбережение – теория и практика» – М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2022. – С. 177-180.
5. Подрезова Ю.А., Подрезов О.А. Изменения климата Бишкека за столетие 1930–2030 гг. // Вестник КРСУ. 2021. Том 21. № 12. – С. 192-198.
6. Метеорология и гидрология в Кыргызстане: Вып. 6 / Под ред. О.А. Подрезов. – Б.: КРСУ, 2008. -132 с.
7. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3 Многолетние данные. Части 1-6. Выпуск 32. Киргизская ССР.- Ленинград: Гидрометеиздат. 1989. 374 с.
8. World weather: сайт. – URL: <https://world-weather.ru>
9. СНиП 2.01.01-82 «Строительная климатология и геофизика»
10. СНиП 23-01-99 «Строительная климатология»
11. СНиП КР 23-01:2013 «Тепловая защита зданий»
12. WetherArhive.ru: сайт. – URL: <http://weatherarchive.ru/Temperature>
13. ГОСТ 30494-2. 9.
14. Свистунов, В.М. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства: Учебник для вузов. – СПб.: Политехника, 2007.
15. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч.1. Отопление / Под редакцией И.Г.Старовойрова. - М.: Стройиздат, 1990.
16. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. М., 2004.

УДК 661.961.62

Д.Д. ГОЛДОБИН, аспирант
А.А. БОРИСОВ, студент
С.Н. ПЕТИН, к.т.н

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14, стр. 1
E-mail: goldobin.mpei@gmail.com, PetinSN@mpei.ru, BorisovAntA@mpei.ru

Моделирование и верификация горелочного устройства для производства водорода автотермической конверсией природного газа

Аннотация. В работе приведены результаты моделирования в Ansys Fluent горелочного устройства для производства водорода автотермической конверсией природного газа и верификация модели на основании опытно-экспериментальных данных

Ключевые слова: водород, природный газ, автотермическая конверсия, моделирование, горелочное устройство

D.D. GOLDOBIN, graduate student
A.A. BORISOV, student
S.N. PETIN, Candidate of Engineering

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya Street, 14, building 1
E-mail: goldobin.mpei@gmail.com, PetinSN@mpei.ru, BorisovAntA@mpei.ru

Modeling and verification of a burner device for the production of hydrogen by autothermal reforming of natural gas

Annotation. This article presents the results of modeling in Ansys Fluent a burner device for the production of hydrogen by autothermal conversion of natural gas and verification of the results with experimental work.

Key words: hydrogen, natural gas, autothermal conversion, modeling, burner

Перспективность водородной энергетики в РФ обусловлена крупными запасами природного газа, что позволяет диверсифицировать использование углеводородного топлива [1]. Среди известных способов производства водорода из природного газа выделяют паровую конверсию и парциальное окисление природного газа, комбинирование которых позволит организовать процесс автотермической конверсии, который позволяет снизить затраты энергоресурсов на производство водорода с улавливанием парниковых газов [2].

Развитие водородной энергетики закреплено в отечественных государственных документах, в которых ставятся не только задачи по развитию технологий, но и их промышленная обработка [3-4]. В связи с высокой зависимостью от зарубежных поставщиков оборудования и лицензиаров, которые ушли с отечественного рынка, требуется разработка отечественного оборудования для производства водорода с целью импортозамещения. Для решения поставленных задач, в первую

очередь, требуется разработка решений при использовании численного моделирования с верификацией данных на основании реального эксперимента. В рамках представленной работы производится разработка модели горелочного устройства для проведения процесса автотермической конверсии природного газа.

Для разработки численной модели в Ansys Fluent была разработана геометрическая модель горелочного устройства, которая представлена на рис. 1.

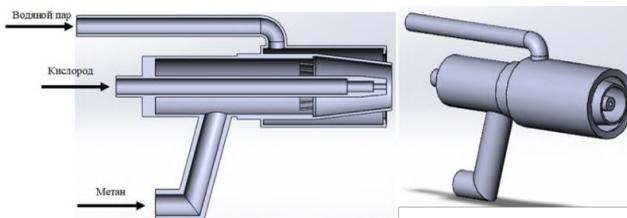


Рис. 1. Геометрическая модель горелочного устройства

Моделирование горелочного устройства производилось с использованием стандартной k-ε модели, которая восстанавливает реалистичную картину потока. Для смешения компонентов использовалась модель Species Transport и Finite-Rate Chemistry, что позволяет моделировать процессы смешения и переноса химических соединений. Для достижения равновесия химических реакций используется механизм Relaxation to the chemical equilibrium.

Для верификации разработанной модели используются результаты опытно-экспериментальных работ, приведенные в статье [5], которые также используются для верификации данных при использовании моделирования газохимических процессов в [6]. Верификация результатов моделирования горелочного устройства с литературными данными приведены в табл. 1.

Таблица 1. Верификация результатов моделирования горелочного устройства с литературными данными

Компонент, об. %	Литературные данные			Собственные расчеты k-ε, Relax to Equilibrium
	Richter, 2015 [5]	Relax to Equilibrium [6]	FR_RANS_G R13.0 [6]	
H ₂	48	37	35	48,67
CO	25,6	19	22	25,95
H ₂ O	21,7	29	31	22,03
CO ₂	3,89	11	6,4	3,34
CH ₄	0,06	4	5	0,00
Σ	99,25	100	99,4	100
Температура, °C	1400	918	1325	1458

Вывод: разработанная численная модель горелочного устройства для производства водорода автотермической конверсии природного газа не противоречит результатам опытно-экспериментальным работам, что подтверждает верность моделирования. Разработанная модель может быть использована на начальных этапах НИОКР по разработке горелочных устройств для производства водорода из природного газа и работах, направленных на развитие и повышение эффективности способов производства водорода из природного газа.

Литература

1. Static Review of World Energy. [Электронный ресурс] – 2022. Режим доступа: <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>.
2. Khojasteh Salkuyeh Y., Saville B.A., MacLean H.L. Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from natural gas using current and emerging technologies // Int. J. Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42, № 30. P. 18894–18909.
3. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации. Утверждена распоряжением Правительством РФ от 05.08.2021 № 2162-р.
4. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 09.10.2020 № 1523-р.
5. Andreas Richter, Peter Seifert, Fred Compart, Paul Tischer, Bernd Meyer, A large-scale benchmark for the CFD modeling of non-catalytic reforming of natural gas based on the Freiberg test plant HP POX, Fuel, Volume 152, 2015, Pages 110-121, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.12.004>.
6. Компьютерное моделирование диффузионного пламени в реформере природного газа. – URL: <https://cae-club.ru/publications/компьютерное-моделирование-диффузионного-пламени-в> (дата обращения 15.03.2023).

УДК 621.1.016.4

А.Д. ЛОБОВ аспирант,
А.А. КОБЗЕВА аспирант,
А.А. ДОБРИНСКАЯ студент,
В.С. ГЛАЗОВ к.т.н.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250 г. Москва, Красноказарменная, д. 14, стр. 1.
E-mail: andreylobov6@gmail.com, mamurik@bk.ru

О тепловой эффективности одиночного ребра, и орбренной поверхности

Аннотация. В работе приведены результаты исследования влияние параметров одиночного прямоугольного ребра на его КПД и эффективность орбренной поверхности. Предложен критерий, снимающий проблемы, связанные с использованием традиционного способа определения эффективности ребра.

Ключевые слова: эффективность, прямоугольное ребро, теплообмен

A.D. LOBOV graduate student,
A.A. KOBZEVA graduate student,
A.A. DOBRINSKAYA student,
V.S. GLAZOV Ph.D.

National Research University "MPEI",
111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 14, p. 1.
E-mail: andreylobov6@gmail.com, mamurik@bk.ru

On the thermal efficiency of a single rib, and a finned surface

Abstract. The paper presents the results of a study of the influence of the parameters of a single rectangular fin on its efficiency and the efficiency of the finned surface. A criterion is proposed that removes the problems associated with the use of the traditional method of determining the efficiency of the fin.

Key words: efficiency, rectangular fin, heat transfer

Среди существующих методик и критериев, позволяющих выбрать рельеф теплообменной поверхности по её энергетической эффективности, есть приём, в котором эффективность ребристой поверхности определяется через эффективность одиночного ребра [1].

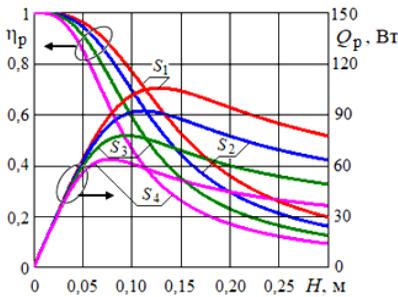
$$\eta_0 = 1 - (1 - \eta_p) (\Psi - 1) / \Psi \quad (1)$$

где η_p – эффективность или КПД ребра, а Ψ – коэффициент оребрения поверхности, равный отношению полной площади ребристой поверхности к площади поверхности без ребер.

Согласно [2] под «тепловой эффективностью ребра», понимается отношение отводимого им теплового потока к тому тепловому потоку, который отвело бы такое же ребро с бесконечно большой теплопроводностью и постоянной температурой всей поверхности, равной температуре в основании ϑ_0 :

$$\eta_p = \left(\int_l \alpha \cdot \vartheta dl \right) / \left(\vartheta_0 \cdot \int_l \alpha dl \right) \quad (2)$$

где l — расстояние вдоль контура профиля ребра; α – коэффициент теплоотдачи. Ясно, что формула (2) может быть использована только тогда, когда значения коэффициентов теплоотдачи у реального и идеального ребра известны и равны. Последнее возможно, если температура омываемой поверхности не влияет на теплофизические свойства теплоносителя. Если же это не так, то эффективность ребра должна определяться по формуле, которая учитывает такой нюанс. Кроме того, судя по рис. 1 и 2 высоким значениям КПД ребра (с теплоизолированной вершиной) соответствуют малые тепловые потоки Q и числа Bi . Причина в том, что малые Bi указывают на наличие мощного сопротивления конвекции, которое больше сопротивления оказываемое процессу теплопроводности.



$S_1=30 \times 10^{-5} \text{ м}^2$; $S_2=20 \times 10^{-5} \text{ м}^2$; $S_3=12 \times 10^{-5} \text{ м}^2$;
 $S_4=6,6 \times 10^{-5} \text{ м}^2$

Рис. 1. Влияние H на Q и η
 при $\alpha_{air} = 54,5 \text{ Вт/м}^2/\text{К}$, $\lambda_{Cu} = 380 \text{ Вт/м/К}$

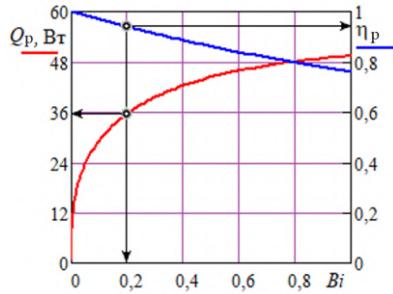


Рис. 2. Влияние Bi на Q и η
 при $\alpha_{air} = 54,5 \text{ Вт/м}^2/\text{К}$,
 $\lambda_{Al} = 200 \text{ Вт/м/К}$

Данный факт свидетельствует о том, что определение КПД ребра (2) не является корректным по отношению к конвективным теплообменным аппаратам. Высокие его значения говорят о блокировании конвективного теплообмена с одновременным переходом на другой механизм переноса теплоты, которому оказывается меньшее сопротивление. По сути, малое термическое сопротивление ребер и межканальных пластин меняет долевое распределение тепловой энергии в теплообменнике между разными механизмами её переноса. В результате такого «переключения» интенсифицируется процесс переноса теплоты теплопроводностью по термически тонкому «скелету» теплообменника, а передача энергии теплоносителям, посредством конвекции, минимизируется. Более того, анализ известных решений [3] указывает на наличие разных экстремумов у теплового потока в зависимости от того, есть ли теплообмен на вершине прямоугольного ребра или его нет. Увеличение коэффициента теплопроводности λ материала ребра при сохранении его материалоемкости S и отсутствия теплообмена на вершине ребра, увеличивает максимум теплового потока Q и соответствующую ему высоту H_{opt} ребра. Увеличение же коэффициента теплоотдачи α , при не изменчивости остальных факторов, смещает оптимальную высоту прямоугольного ребра в сторону малых высот. Наличие экстремума (максимума) у теплового потока указывает на возможность введения альтернативного критерия для КПД ребра, с теплоизолированной вершиной, в виде выражения (3), которое устанавливает, насколько конвективная теплоотдача реального ребра отличается от максимально возможной

$$\eta_p = (Q_{реал}/Q_{реал}^{max})(Q_{реал}^{max}/Q_{эт}^{max}) = Q_{реал}/Q_{эт}^{max}, \quad (3)$$

Здесь $Q_{\text{реал}}^{\text{max}}$ и $Q_{\text{эт}}^{\text{max}}$ тепловые потоки, соответствующие прямоугольным ребрам с высотами, определяемыми по формуле

$$H_{\text{опт}} = 1,002(S\lambda/\alpha)^{1/3}, \quad (4)$$

а подстрочные индексы «реал» и «эт» указывают на то, что величина Q , вычисляемая по формуле

$$Q = \lambda \cdot L \cdot S/H^2 \cdot (t_{\text{очн}} - t_{\infty}) \cdot \sqrt{Bi} \cdot th(\sqrt{Bi}), \quad (5)$$

относится к реальному или эталонному ребру. Используемые в (5) обозначения приведены на рис. 3. Совместное использование выражения (4) с эмпирическими выражениями, привлекаемых для расчета коэффициентов теплоотдачи и аэродинамического сопротивления, может повысить точность методов расчета теплообменников, в которых эффективность теплообменного оборудования определяется по известным критериям М.В. Кирпичева, А.А. Гухмана и других ученых.

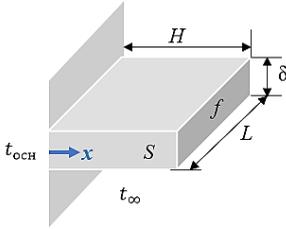


Рис. 3. Прямоугольное ребро

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, гос. задание № FSWF-2023-0017.

Литература

1. Теплоэнергетика и теплотехника: Справочная серия: В 4 кн. / под общ. ред. Член-корр. РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина. – 4-е изд. стереот. – М.: Издательский дом МЭИ. 2007. Кн. 4. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник. – М.: - 632 с. ISBN 978-5-383-00019-9.
2. Юдаев В.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача: Учеб. Для энергетич. спец. Втузов. – М.: Высш. Шк. 1988. – 479 с.
3. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 512 с.

УДК 628.193

М.Ю. ЮРКИНА, к.т.н., доцент,
Т.А. МАТУХНОВ, аспирант,
О.Д. МАТУХНОВА, аспирант

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250 г. Москва, ул. Красноказарменная 17
E-mail: MatukhnovTA@gmail.com

Анализ влияния отложений солей жесткости на параметры работы системы теплоснабжения

Аннотация. В работе рассмотрены причины образования отложений солей жесткости на поверхности различных элементов системы. Представлен анализ химического состава отложений в системе централизованного теплоснабжения г.

Москвы. Проведен анализ влияния толщины отложений солей жесткости на параметры работы системы теплоснабжения для разных диаметров трубопроводов.

Ключевые слова: отложения, теплоснабжение, гидравлический режим.

M.Y. YURKINA, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
T.A. MATUKHNOV, Ph.D. candidate,
O.D. MATUKHNOVA, Ph.D. candidate

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
111250 Moscow, Krasnokazarmennaya st. 17
E-mail: MatukhnovTA@gmail.com

Analysis of the effect of hardness salt deposits on the operation parameters of the heat supply system

Abstract. The paper considers the reasons for the formation of deposits of hardness salts on the surface of various elements of the system. An analysis of the chemical composition of deposits in the Moscow district heating system is presented. The influence of the thickness of deposits of hardness salts on the parameters of the heat supply system for different diameters of pipelines was analyzed.

Key words: deposits, heat supply, hydraulic mode.

Образование отложений солей жесткости на внутренних поверхностях трубопроводов и теплотехнического оборудования является одной из наиболее распространенных проблем в системах теплоснабжения, которые могут привести к снижению эффективности работы системы, а также возникновению аварийных ситуаций.

Основной механизм образования накипи связан с процессом кристаллизации солей из воды на поверхности различных элементов системы, включая трубы, котлы, теплообменные аппараты и другие узлы любой системы, использующей воду для теплообмена, такие как системы холодного и горячего водоснабжения, кондиционирования воздуха, промышленное оборудование и другие [1]. Причина образования накипи связана с тем, что большинство водных источников содержат различные соли, такие как кальций, магний, железо, которые при нагревании воды начинают выделяться в виде кристаллов и затем оседать на стенках трубопроводов, теплообменников и других элементах системы теплоснабжения. Проблема образования накипных отложений в трубопроводах может быть вызвана следующими факторами [2]:

1. Растворенные в воде соли;
2. Взвешенные вещества (частицы размером от 1 до 15 мкм, содержащиеся в воде песок, ил и т.д.);
3. Микроорганизмы, размеры которых колеблются от 1 мкм до 1 мм;
4. Продукты коррозии металла оборудования систем.

Понимание причин образования накипи и связанных с ними проблем является важной задачей для разработки эффективных методов борь-

бы с этой проблемой и обеспечения бесперебойной работы системы теплоснабжения.

На основании проведенных лабораторных исследований по анализу химического состава отложений можно сделать следующий вывод: основу отложений в системе централизованного теплоснабжения г. Москвы составляют соединения железа – 43% и ионы кальция Ca – 36%. (рис. 1)

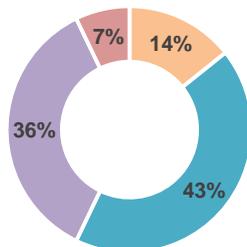


Рис. 1. Виды накипи, образующейся в системе теплоснабжения г. Москва

- Силикатная накипь с содержанием кремнекислоты
- Силикатная накипь с содержанием оксида железа
- Карбонатная накипь
- прочие

В работе исследовалось влияния отложений солей жесткости на следующие параметры работы системы теплоснабжения:

- гидравлическое сопротивление;
- расход электрической энергии на прокачку теплоносителя;
- термическое сопротивление.

Для проведения расчетов были рассмотрены трубопроводы внутренним диаметром 10 мм, 100 мм, 300 мм и 600 мм. Влияние толщины отложений на параметры работы системы теплоснабжения представлены в табл. 1-3.

Таблица 1. Увеличение гидравлического сопротивления при образовании отложений

Внутренний диаметр трубы, мм	10	100	300	600
Толщина слоя накипи, мм	Увеличение гидравлического сопротивления, %			
0,3	36,26%	3,05%	1,01%	0,50%
0,6	89,49%	6,22%	2,02%	1,01%
0,9	169,73%	9,51%	3,05%	1,51%
1,2	294,40%	12,91%	4,10%	2,02%
1,5	494,99%	16,45%	5,15%	2,54%
1,8	831,32%	20,12%	6,22%	3,05%
2,1	1423,56%	23,93%	7,30%	3,57%
2,4	2530,17%	27,88%	8,40%	4,10%
2,7	4755,24%	31,99%	9,51%	4,62%
3	9665,62%	36,26%	10,63%	5,15%

Таблица 2. Увеличение э/э на прокачку теплоносителя при образовании отложений

Внутренний диаметр трубы, мм	10	100	300	600
Толщина слоя накипи, мм	Перерасход э/э на прокачку теплоносителя, %			
0,3	36,26%	3,05%	1,01%	0,50%
0,6	89,49%	6,22%	2,02%	1,01%
0,9	169,73%	9,51%	3,05%	1,51%
1,2	294,40%	12,91%	4,10%	2,02%
1,5	494,99%	16,45%	5,15%	2,54%
1,8	831,32%	20,12%	6,22%	3,05%
2,1	1423,56%	23,93%	7,30%	3,57%
2,4	2530,17%	27,88%	8,40%	4,10%
2,7	4755,24%	31,99%	9,51%	4,62%
3	9665,62%	36,26%	10,63%	5,15%

Таблица 3. Увеличение термического сопротивления при образовании отложений

Толщина стенки трубы, мм	3,5	7	45	60
Толщина слоя накипи, мм	Увеличение термического сопротивления, %			
0,3	436,09%	218,05%	33,92%	25,44%
0,6	872,18%	436,09%	67,84%	50,88%
0,9	1308,27%	654,14%	101,75%	76,32%
1,2	1744,36%	872,18%	135,67%	101,75%
1,5	2180,45%	1090,23%	169,59%	127,19%
1,8	2616,54%	1308,27%	203,51%	152,63%
2,1	3052,63%	1526,32%	237,43%	178,07%
2,4	3488,72%	1744,36%	271,35%	203,51%
2,7	3924,81%	1962,41%	305,26%	228,95%
3	4360,90%	2180,45%	339,18%	254,39%

Таким образом, образование отложений солей жесткости на внутренней поверхности трубопроводов и теплотехнического оборудования приводит к уменьшению внутреннего диаметра трубопровода, что негативно влияет на гидравлический и тепловой режимы работы системы.

Вывод.

Исходя из вышеизложенного, изменение проходного сечения диаметра теплообменного оборудования и трубопроводов вследствие образования отложений увеличивает гидравлическое и термическое сопротивления, что приводит к повышению расхода электроэнергии на перекачивание теплоносителя и увеличению расхода топлива на производство тепловой энергии.

Литература

1. Копылов А.С. Водоподготовка в энергетике: учебное пособие для вузов / А.С. Копылов, В.М. Лавыгин, В.Ф. Очков. – 2-е изд., стер. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2006. – 309 с.

2. Муравьев А.В. Моделирование процесса образования отложений в каналах энергетических установок с кольцевыми турбулизаторами: диссертация кандидата технических наук: 01.04.14, 05.14.04 / Муравьев Анатолий Викторович. - Воронеж, 2009. - 147 с.

УДК 628.165

О.Д. МАТУХНОВА, аспирант,
А.Б. ГАРЯЕВ, д.т.н., профессор

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250 г. Москва, ул. Красноказарменная 17
E-mail: matukhnova_olga@mail.ru

Сравнительный анализ эффективности опреснительных установок

Аннотация. В статье рассмотрены наиболее распространенные методы опреснения. Проведен сравнительный анализ основных энергетических показателей опреснительных установок. Представлен расчет эксергетического КПД, а также приведены результаты оценки наиболее эффективного метода опреснения. Эксергетический анализ показал, что наиболее эффективной установкой для опреснения морской воды является тепловая парокомпрессионная дистилляция (TVC).

Ключевые слова: опреснение, эксергетический КПД, дистилляция.

O.D. MATUKHNOVA, Ph.D. candidate,
A.B. GARYAEV, Doctor of Engineering, Professor

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
111250 Moscow, Krasnokazarmennaya st. 17
E-mail: matukhnova_olga@mail.ru

Comparative analysis of the efficiency of desalination plants

Abstract. The article discusses the most common methods of desalination. A comparative analysis of the main energy indicators of desalination plants has been carried out. The calculation of the exergy efficiency is presented, as well as the results of evaluating the most efficient desalination method. An exergy analysis has shown that the most efficient plant for seawater desalination is thermal vapor compression distillation (TVC).

Key words: desalination, exergy efficiency, distillation.

Пресная вода является одним из важнейших источников жизнедеятельности людей и выступает сырьём для различных отраслей промышленности, энергетики, муниципального водоснабжения и сельского хозяйства. В связи с этим в мире наблюдается нарастающий дефицит пресной воды. За последние 40 лет количество пресной воды на каждого человека в мире сократилось на 60% [1].

В целях сокращения дефицита пресной воды предлагается процессы опреснения морской воды. Большинство процессов опреснения воды можно разделить на два типа: термические процессы с изменением фазы

и мембранные процессы. Наиболее распространенными являются следующие типы опреснения, имеющие разный принцип действия и разное потребление энергии: дистилляция мгновенным вскипанием MSF (Multi-stage Flash Distillation), многоступенчатая дистилляция MED (Multiple Effect Distillation), парокомпрессионная дистилляция (VCD), которая делится на тепловую (TVC) и механическую (MVC), а также обратный осмос (RO) (Reverse Osmosis). В работе не рассматривался метод электродиализа ED (Electrodialysis), так как этот способ опреснения является наиболее энергозатратным среди перечисленных установок.

Совершенствование процесса опреснения и снижение затрат на выработку воды прежде всего направлено на уменьшение расходов энергии. Одним из способов повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов является развитие локальных автономных источников комбинированного производства электрической энергии и пресной воды.

В работе проведено сравнение установок комбинированной генерации по следующим критериям: количество полученной электроэнергии и пресной воды на единицу затраченного топлива и площадь, занимаемая установкой. Согласно полученным результатам одной из наиболее эффективных установок является тепловая парокомпрессионная дистилляция (TVC).

Комплексная оценка эффективности установок для опреснения морской воды учитывает совокупность факторов, которые влияют на энергопотребление и качество пресной воды. Одним из важных показателей эффективности опреснительных установок является эксергетический КПД.

Уравнение баланса эксергии стационарного состояния:

$$\sum E_{\text{ВХ}} = \sum E_{\text{ВЫХ}} + \sum \Pi \quad (1)$$

где $\sum E_{\text{ВХ}}$ – суммарная эксергия системы на входе (кДж); $\sum E_{\text{ВЫХ}}$ – суммарная эксергия системы на выходе (кДж), $\sum \Pi$ – суммарные потери эксергии (кДж).

Отношение эксергии $\sum E_{\text{ВЫХ}}$, отводимой из системы, к подведенной эксергии $\sum E_{\text{ВХ}}$ представляет собой эксергетический КПД, который характеризует степень приближения системы к идеальной:

$$\eta_e = \frac{\sum E_{\text{ВЫХ}}}{\sum E_{\text{ВХ}}} \quad (2)$$

Эксергия рабочего тела в каждой точке, рассчитанная по его свойствам, равна:

$$E_i = G_i[(h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)] \quad (3)$$

где G_i – массовый расход рабочего тела (кг/с), h_i – энтальпия рабочего тела (кДж/кг), h_0 – энтальпия рабочего тела при нормальных условиях (кДж/кг), s_i – энтропия рабочего тела (кДж/кг*К), s_0 – энтропия рабочего тела при нормальных условиях (кДж/кг*К), T_0 – температура окружающей среды (К).

В данной работе были проведены расчеты затрат тепловой и электрической энергии для опреснения морской воды, максимальная производительность пресной воды одним модулем в сутки и эксергетический КПД опреснительных установок, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1. Энергетические показатели опреснительных установок

Тип установки	MSF	MED	TVC	MVC	RO
Расход электрической энергии, кВт·ч / м ³ пресной воды (кг у.т/ м ³)	3,5-5 (0,43-0,62)	1,5-2,5 (0,18-0,31)	1,5-2,5 (0,18-0,31)	8-16 (0,98-1,97)	4-8,5 (0,49-1,05)
Расход тепловой энергии, кВт·ч / м ³ пресной воды (кг у.т/ м ³)	65-110 (8,00-13,53)	60-220 (7,38-27,06)	60-160 (7,38-19,68)	- -	- -
Максимальная производительность модуля (системы), м ³ /сут	75 000	35 000	4000	75000	2500
Требуемая электрическая мощность установки, кВт	140-200	60-100	60-100	320-640	160-340
Требуемая тепловая мощность установки, кВт	2600-4400	2400-8800	2400-6400	-	-
Эксергетический КПД, %	10,6	10,5	10,7	12,6	-

Согласно проведенному анализу, наиболее эффективными являются: тепловая парокompрессионная дистилляция (TVC), требующая для своей работы в основном теплоту, однако использующая также электрическую энергию на работу насосов и установка с механической парокompрессионной дистилляцией MVC.

Вывод. Сравнительный анализ эффективности опреснительных установок показал, что установки TVC и MVC является наиболее энергетически эффективной по сравнению с другими рассматриваемыми методами опреснения.

Литература

1. Кирпичникова И.М., Экспериментальные исследования лабораторного опреснителя / И.М. Кирпичникова, И.Р. Рахматулин// Альтернативная энергетика и экология. – №1, 2013. С. 40 – 43
2. Hamed O.A., Zamamiri A.M., Aly S. and Lior N., 1996, Thermal performance and exergy analysis of thermal vapor compression desalination system, Energy Convers Mgmt, 37: 379-387.
3. Бирюк В.В., Благин Е.В., Горшкалев А.А., Шиманов А.А., Курчаткин И.В., Методика оценки эффективности дистилляционных опреснительных установок. Успехи современной науки 2016, Том 8, №12
4. Казаков В.Г., Луканин П.В., Смирнова О.С. Эксергетические методы оценки эффективности теплотехнологических установок: учебное пособие. (Рекомендовано ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ») / СПб ГТУРП. СПб., 2013.- 93 с.: ил.20.

УДК 536.24

И.О. ОДИНЦОВ, аспирант,
А.Б. ГАРЯЕВ, д.т.н.,
Д.В. ОГОРОДОВА, магистр

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250 г. Москва, Красноказарменная, 17
E-mail: OdintsovIO@mpei.ru

Теплообмен в канале между пластинами отопительного конвектора

Аннотация. В работе приведены результаты численного моделирования процесса свободной конвекции в системе двух плоских параллельных пластин. Получена зависимость теплового потока от расстояния между пластинами и их температурами.

Ключевые слова: свободная конвекция, численное моделирование, теплообмен в канале

I.O. ODINTSOV, Ph.D. candidate,
A.B. GARYAEV, Doctor of Engineering,
D.V. OGORODOVA, graduate student

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
111250 Moscow, Krasnokazarmennaya, 17
E-mail: OdintsovIO@mpei.ru

Heat exchange in the channel between the plates of the heating convector

Abstract: The article presents the results of numerical simulation of the process of free convection in a system of two flat parallel plates. The dependence of the heat flux on the distance between the plates and their temperatures is obtained.

Key words: free convection, numerical modeling, heat transfer in the channel

Естественная конвекция как форма переноса тепла широко применяется для охлаждения оборудования в тяжелой промышленности, приборостроении, микроэлектронике и машиностроении. Одним из основных преимуществ теплообмена естественной конвекцией по сравнению с вынужденной, является отсутствие дополнительного нагнетателя, который требует электропитания и обслуживания. Это делает организацию теплообмена дешевле и проще.

При создании систем нагрева и охлаждения с использованием естественной конвекции возникают сложности с проектированием орбренных теплообменных аппаратов, связанные с отсутствием расчётных зависимостей, учитывающих как геометрию аппарата, так и особенности теплообмена. При разработке таких зависимостей требуется применять как эмпирические, так и численные методы. Очевидно, что исследование эмпирическим методом является более ресурсоёмким, а

главным недостатком является невозможность предсказать параметры проектируемого теплообменного аппарата.

Альтернативными методами исследования могут служить различные численные методы, а именно методы вычислительной гидродинамики (CFD). Использование численных методов позволяет решить задачу оптимизации теплопередающих оребренных поверхностей.

Решение данной задачи позволит снизить металлоёмкость теплопередающего оборудования и уменьшить площадь поверхности теплообмена с сохранением мощности теплообменного аппарата.

Однако, результаты, полученные в программных пакетах вычислительной гидродинамики, нередко могут вызывать сомнения, связанные с ошибкой в программе, неправильно выбранной сеткой и т.д [1]. Для проверки правильности численных расчётов было произведено сопоставление результата решения, полученное Е. Польгаузенем [2] и решения в CFD для одиночной вертикальной пластины (рис.1). По итогу сравнения было установлено, что результат решения в CFD и Е. Польгаузена практически идентичен. Это означает, что в подобных случаях программа даёт достоверные результаты.

Следующим этапом было сравнение решений для двух параллельных пластин, с аналитическим решение приведенным в работе [3]. Сравниваем случай, в котором температура пластин одинакова и равна по всей ее поверхности, при этом числа Рэлея $Ra = 1000$ (рис.2). Полученное численное решение практически полностью совпадает с аналитическим, что свидетельствует о правильном решении в случае с параллельными пластинами.

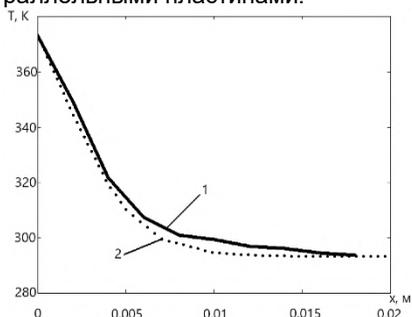


Рис. 1. сравнение решения Польгаузена (1) и CFD решения (2)

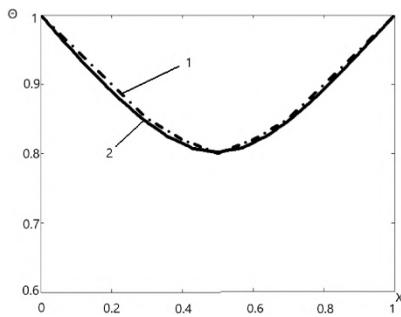


Рис. 2. сравнение аналитического решения (1) и CFD решения (2)

Далее было произведено численное моделирование процесса естественной конвекции в плоском канале, при переменной ширине канала и варьирующейся температурой плоских параллельных пластин. Высота канала равнялась 0.1 м, ширина изменялась от 0.01 м до 0.02 м, температура варьировалась от 60 °С до 100 °С.

По результатам численного моделирования был получен график зависимости теплового потока от ширины канала (Рис.3). По графику выявлено, что зависимость теплового потока от ширины пластины имеет экстремум, причем для каждой температуры пластины этот экстремум разный. Так, например, для температуры пластин равной 100 °С экстремум, то есть максимальное значение теплового потока, находится при ширине канала 0.016 м, а для 60 °С этот экстремум находится при ширине канала 0.018 м.

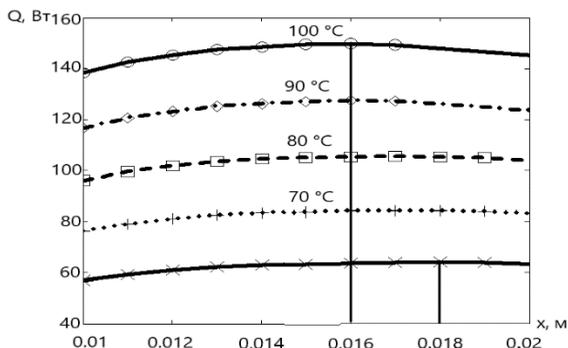


Рис. 3. Зависимость теплового потока от расстояния между пластинами

Вывод: таким образом, было установлено, что оптимальное расстояние, при котором тепловой поток максимальный, для каждой температуры имеет своё значение. При повышении температуры экстремум смещается в сторону уменьшения расстояния между пластинами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, гос. задание № FSWF-2023-0017.

Литература

1. Калиткин Н.Н. Численные методы. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», М., 1978, - 512 с.
2. Цветков Ф.Ф. Теплообмен: учебник для вузов/ Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 562 с.
3. Терехов, В. И. Ламинарная свободная конвекция между вертикальными параллельными пластинами с различными температурами / В. И. Терехов, А. Л. Экаид // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19, № 4. – С. 415-429.

УДК 620.9:662.92.001.5

С.К. ПОПОВ, д.т.н.,
А.А. ВАЛИНЕЕВА, ст. преподаватель,
В.А. МУЧНИК, бакалавр

Национальный исследовательский университет "МЭИ"
111250 г. Москва, Красноказарменная улица 14
E-mail: popovsk@mpei.ru, nnita@rambler.ru

Моделирование тепломассопереноса при пиролизе биомассы

Аннотация. В работе представлены результаты разработки и исследования математической модели пиролиза одиночной частицы биомассы.

Ключевые слова: пиролиз, биомасса, математическое моделирование, тепломассоперенос

S.K. POPOV, Doctor of Engineering,
A.A. VALINEEVA, Senior lecturer,
V.A. MUCHNIK, Bachelor

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya St. 14
E-mail: popovsk@mpei.ru, nnita@rambler.ru

Modeling of heat and mass transfer during biomass pyrolysis

Abstract. The paper presents the results of the development and study of a mathematical model for the pyrolysis of a single biomass particle.

Key words: pyrolysis, biomass, mathematical modeling, heat and mass transfer

Торрефикация биомассы (низкотемпературный пиролиз в интервале температур 200–300 °С) позволяет существенно улучшить ее характеристики (теплота сгорания, гидрофобность, измельчаемость) для дальнейшего использования либо как самостоятельного топлива, либо в других теплотехнологиях. В этой связи актуальна задача разработки математической модели пиролиза частицы биомассы для научных исследований и создания реакторов торрефикации.

На основе [1, 2] разработаны концептуальная модель и математическое описание процесса сушки и пиролиза одиночной частицы углерод-содержащего материала в нагретом газовом потоке.

Рассматривается сферическая пористая частица диаметром d_0 . Ее структура характеризуется объемными долями твердой, жидкой и газовой фаз (соответственно – $\varepsilon_s, \varepsilon_w, \varepsilon_g$), а также проницаемостью K , m^2 , фигурирующей в законе фильтрации Дарси. Поля температуры T , скорости газовой фазы внутри частицы, давления газа p изменяются по радиусу r и во времени τ .

Математическое описание процесса включает следующую систему уравнений. Уравнения баланса и массы соответственно твердой фазы и жидкой фазы – воды, содержащейся в частице,

$$\frac{\partial \varepsilon_s \rho_s}{\partial \tau} = -\dot{S}_{sg}, \quad \frac{\partial \varepsilon_w \rho_w}{\partial \tau} = -\dot{S}_{wg}$$

Уравнение баланса массы газовой фазы

$$\frac{\partial \varepsilon_g \rho_g}{\partial \tau} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 (\varepsilon_g \rho_g u)) = \dot{S}_{sg} + \dot{S}_{wg}$$

Уравнение количества движения газовой фазы

$$\frac{\partial \varepsilon_g \rho_g u}{\partial \tau} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 (\varepsilon_g \rho_g u u)) = -\frac{\partial \varepsilon_g p}{\partial r} - \frac{\mu \varepsilon_g}{K} u$$

Уравнение энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{ef} c_{ef} T}{\partial \tau} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 (\varepsilon_g \rho_g c_{p,g} T u)) = \\ = -\varepsilon_g p \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 u) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \left(-\lambda_{ef} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) + \Psi. \end{aligned}$$

Здесь ρ_s , ρ_w , ρ_g – плотности твердой, жидкой и газовой фаз, кг/м³; \dot{S}_{sg} , \dot{S}_{wg} – источниковые члены, характеризующие соответственно процесс выделения летучих (процесс solid→gas) и испарения/конденсации (процесс water↔gas), кг/м³/с; μ , $c_{p,g}$ – динамическая вязкость (Па·с) и удельная теплоемкость (Дж/кг/К) газа; ρ_{ef} , c_{ef} , λ_{ef} – эффективные плотность (кг/м³), удельная теплоемкость (Дж/кг/К) и теплопроводность (Вт/м/К) частицы; Ψ – источниковый член уравнения энергии, Вт/м³.

Методом контрольного объема получены дискретные аналоги дифференциальных уравнений с использованием чисто неявной схемы, а также схемы «против потока» для конвективных членов уравнений.

Выполнена программная реализация математической модели.

В [2] исследован пиролиз сухой частицы биомассы при следующих условиях: $d_0 = 7,5$ мм; $\rho_{ef} = 700$ кг/м³; $c_{ef} = 1500$ Дж/кг/К; $\lambda_{ef} = 0,14$ Вт/м/К; $w_{gas} = 10^{-4}$ м/с; $T_{gas} = 1273$ К; начальная температура частицы 488 К. Установлено, что степень пиролиза $\eta_{pyrol} = 0,9$ достигается за время 21,0 с. Степень пиролиза определяется по формуле

$$\eta_{pyrol} = (\varepsilon_s^0 - \varepsilon_s^{mid}(\tau)) / (\varepsilon_s^0 - \varepsilon_s^\infty),$$

где $\varepsilon_s^0 = \varepsilon_s(\tau=0)$; $\varepsilon_s^\infty = \varepsilon_s(\tau \rightarrow \infty)$; $\varepsilon_s^{mid}(\tau)$ – величина ε_s , средняя по объему частицы в момент τ .

В указанных условиях во внешнем теплообмене преобладает радиационная теплоотдача, поэтому результаты расчета существенно зависят от ε_p – коэффициента теплового излучения (степени черноты) поверхности частицы (*particle*). Выполнено исследование влияния ε_p на показатели процесса пиролиза (рис. 1, 2).

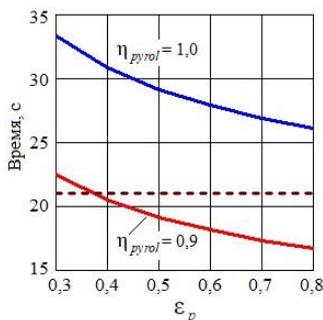


Рис. 1. Зависимости времени достижения заданной степени пиролиза от ε_p

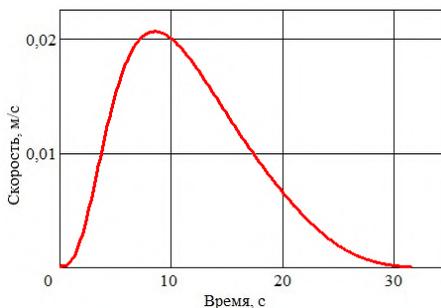


Рис. 2. Зависимость скорости газов на поверхности частицы от времени

Разработанная программа дает при $\varepsilon_p = 0,37$ результат, совпадающий с опубликованным в [2]: степень пиролиза $\eta_{pyrol} = 0,9$ достигается за 21,0 с. Таким образом, программа позволяет получать результаты, не противоречащие данным других авторов. В дальнейшем предполагается провести проверку адекватности модели, используя экспериментальные данные по пиролизу углеродсодержащих материалов.

Математическая модель может быть использована в научных исследованиях и в инженерной практике при создании установок пиролиза углеродсодержащих материалов, в том числе торрефикации биомассы.

Литература

1. Wardach-Swiecicka I., Kardaś D. Modelling thermal behaviour of a single solid particle pyrolysing in a hot gas flow // Energy, 221 (2021) 119802. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119802
2. Wardach-Swiecicka I., Kardaś D. Modeling of heat and mass transfer during thermal decomposition of a single solid fuel particle // Archives of Thermodynamics, 34 (2013), No. 2, 53–71. DOI: 10.2478/aoter-2013-0010

УДК 621.565.93/.95

О.Е. ПРУН, ст.преподаватель,
А.Б. ГАРЯЕВ, д.т.н.

Научно-исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, Красноказарменная улица, д. 14, стр. 1
E-mail: olgaproon@mail.ru

Оптимизация тепло-гидравлических характеристик теплообменников-теплоутилизаторов

Аннотация. В работе предложен метод оптимизации теплообменных аппаратов, работающих в системах утилизации теплоты с промежуточным теплоносителем.

Ключевые слова: теплообменник, оптимизация, тепло-гидравлические параметры.

O.E. PRUN, Lecturer,
A.B. GARYAEV, PhD

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
Krasnokazarmennaya 14, build. 1, Moscow, 111250, Russia
E-mail: olgaproon@mail.ru

Optimization of heat and hydraulic parameters in heat-utilizers

Abstract. The optimization method for heat-recovery systems with intermediate coolant is represented in this article.

Key words: heat exchanger, optimization, heat and hydraulic parameters.

Теплообменные аппараты теплоутилизационных установок, которые применяются в энергетике, как правило рассчитываются на обеспечение требуемой тепловой мощности при заданных ограничениях по падению давления теплоносителей. К таким аппаратам относятся конденсеры газотурбинных установок, теплообменники промышленных печей в производстве стали и стекла, в сушильных установках, в системах отопления, вентиляции и кондиционирования, которые обслуживают как промышленные, так и общественные объекты, и др.

Системы утилизации теплоты могут представлять собой как отдельный аппарат, так и систему теплообменников, соединенных контуром с промежуточным теплоносителем (далее – ПТН; см рис. 1), с тепловыми трубами или теплонасосную установку, повышающую потенциал тепловой энергии.

Так как срок эксплуатации теплообменных аппаратов составляет десятки лет, стоимость утилизированной тепловой энергии за этот период может в несколько раз превосходить их первоначальную стоимость, но и эксплуатационные затраты за весь период их работы становятся значительной величиной. Поэтому для обеспечения максимальной экономии в теплоутилизационной установке, необходимо также и

снижать суммарные затраты электрической энергии на прокачку теплоносителей.

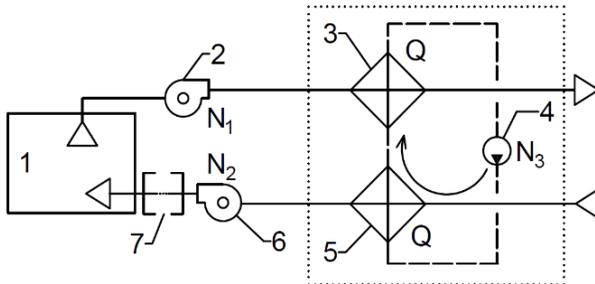


Рис. 1. Схема утилизации теплоты вытяжного воздуха с ПТН: 1 – помещение, 2 – вытяжной вентилятор, 3 – водонагреватель, 4 – насос в водяном контуре, 5 – воздушонагреватель, 6 – приточный вентилятор, 7 – прочее оборудование систем вентиляции или кондиционирования

В работах [1-3] предложен метод оптимизации конструктивных и режимных параметров теплообменников с помощью теплогидравлической функции Z , вычисляемой по формуле (1):

$$Z = Q - b \cdot \sum N, \quad (1)$$

где Q – тепловая мощность теплообменника, $\sum N$ – суммарная электрическая мощность нагнетателей, b – коэффициент, характеризующий соотношение ценности теплоты и электричества.

Применение ПТН (рис. 1) связано с тем, что забор свежего и выброс вытяжного воздуха должны осуществляться на значительном расстоянии друг от друга, что не позволяет для утилизации теплоты использовать одиночный теплообменник. Поэтому суммарная электрическая мощность должна определяться как $\sum N = N_1 + N_2 + N_3$, т.е. с учетом затрат на прокачку промежуточного теплоносителя, например, воды.

На рис. 2 изображены результаты расчёта теплогидравлической функции Z для системы с ПТН. Исходные данные для расчёта следующие: температура вытяжного воздуха на входе в утилизатор $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура свежего воздуха $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход воздуха 1 кг/с , $b = 3.3$, конструкция аппарата соответствует типу ВНВ 243.1-065-043-4-4,0-08. В расчёте варьировался расход воды от 0.1 до 4 кг/с , и расстояние между аппаратами 3 и 5 (согласно рис.1) от 2 до 500 м . На график 2а нанесена линия $Z = 0$, за которой утилизация тепла выбранным способом нецелесообразна ($Z < 0$), а также линия «хребта» функции $Z = \max$.

По линии $Z = \max$ можно определить оптимальное значение расхода воды в контуре промежуточного теплоносителя для заданного расстояния между теплообменниками.

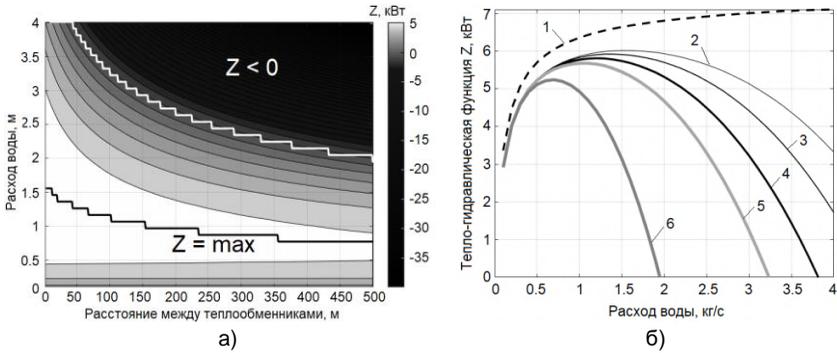


Рис. 2. Результаты расчёта тепло-гидравлической функции Z :

- 1 – тепловая мощность, 2 – значение Z для расстояния 2 м, 3 – то же для 20 м, 4 – то же для 50 м, 5 – то же для 100 м, 6 – то же для 500 м

Вывод: с помощью функции Z можно сделать вывод о том, что при расстоянии между аппаратами 3 и 5, равному 100 м, оптимальным расходом воды будет 1.1 кг/с, при этом экономия тепловой энергии составит 5,7 кВт.

Предлагаемый метод оптимизации можно рассматривать шире – для оценки качества работы теплообменников других систем по сравнению с теоретически наилучшим вариантом и для разработки мер по повышению их энергоэффективности, а также для подбора наилучшего аппарата из типоразмерных сеток разных производителей. Всё это в конечном итоге позволит снизить затраты условного топлива на производство единицы выпускаемой продукции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, гос. задание № FSWF-2023-0017.

Литература

1. А.Б. Гаряев, О.Е. Прун, А.В. Клименко «Определение оптимального соотношения характеристик микроканальных теплообменных аппаратов» // Теплофизика и аэромеханика. Том 22, №6. / Новосибирск: Издательство СО РАН, 2015 – стр.: 751 – 760 стр.
2. Прун О.Е., Гаряев А.Б., Сынков И.В. «Оптимизация теплогидравлических характеристик водоохлаждаемых газоходов для утилизации теплоты выхлопных газов газоперекачивающих агрегатов» // Вестник МЭИ: теоретический и научно-практический журнал. №6 / Москва: Издательский дом МЭИ, 2017 – стр.30-35
3. О.Е. Прун, А. Б. Гаряев «Метод оптимизации теплообменных аппаратов, работающих в системах утилизации тепла» // Теплоэнергетика, 2020, № 8, с. 78–85 DOI: 10.1134/S0040363620080044

УДК 66.042.88

М.С. ПУРДИН, к.т.н., доцент
Р. МАГОМЕДОВА, студент

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.17, В-104
E-mail: PurdinMS@mpei.ru, MagomedovaR@mpei.ru

Тепловые притоки и потери в грунтовых теплообменниках и аккумуляторах теплоты

Аннотация. В работе представлены результаты расчета тепловых притоков к грунтовым теплообменникам и тепловых потерь от грунтовых аккумуляторов теплоты.

Ключевые слова: Грунтовой теплообменник, грунтовой аккумулятор теплоты, регенерация теплоты, тепловые потери.

M.S. PURDIN, Ph.D.,
R. MAGOMEDOVA, student

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya street, 17, V-104
E-mail: PurdinMS@mpei.ru, MagomedovaR@mpei.ru

Heat inflows and losses in ground heat exchangers and heat accumulators

Abstract. The article presents the results of calculation of heat inflows to ground heat exchangers and heat losses from ground heat accumulators.

Key words: Ground heat exchanger, ground heat accumulator, heat recovery, heat losses.

Введение. В последние годы все чаще реализуются проекты по теплоснабжению зданий от грунтовых теплообменников, например, в Сиань [1] или Нюрнберге [2]. Проводятся сопоставление характеристик грунтовых теплообменников разных форм [3], численные исследования их тепловой устойчивости и эффективности, например, в работе [4] сделаны выводы о том, что при отборе теплоты снижается температура грунта с каждым годом асимптотически, а теплота возвращается за счет движения грунтовых вод и теплопроводности. В экспериментальных работах [5-7] показано, что для грунтов, состоящих из мелких песков, супесей и глин, уравнение теплопередачи может не содержать конвективных членов. Для расчетов процессов промерзания грунта разработан новый безусловной устойчивый метод численного моделирования [8]. Пульсирующее движение теплоносителя в скважине оказывает влияние на интенсивность теплообмена [9-10]. Все это указывает на актуальность исследований в этой области.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу теплообмена в грунте от цилиндрического тела, представляющего грунтовый теплообменник. В таком случае уравнение теплопередачи [11] в грунте имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

где T – температура, К; r и z – радиальная и осевая координаты, м.

Приведем уравнение (1) к безразмерному виду

$$\frac{1}{R+1} \frac{\partial}{\partial R} \left((R+1) \frac{\partial \vartheta}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial Z^2} = 0, \quad (2)$$

где $R = (r - l_r) / l_r$ и $Z = z / l_z$ – безразмерные радиальная и осевая координаты; l_r – характерные внутренний радиус, м; $\vartheta = (T - T_{oc}) / (T_0 - T_{oc})$ – безразмерная температура; T_0 и T_{oc} – температура поверхности цилиндрического тела и окружающей среды, К. Геометрическое представление расчетной области с граничными условиями в безразмерном виде представлены на рис. 1. Координата σ подбирается такой, чтобы $\vartheta_{R=\sigma} = 0,002$. Число Био $Bi = \alpha l_r / \lambda$ определяет интенсивность теплоотдачи на поверхности грунта, где α – коэффициент теплоотдачи на поверхности грунта, Вт/(м²К); λ – теплопроводность грунта, Вт/(мК). Координата $\gamma = l_z / l_r$ соответствует относительной глубине грунтового теплообменника или аккумулятора теплоты, где l_z – характерная глубина грунтового теплообменника, м.

Задача решается методом конечных разностей [12] с применением безусловно устойчивых схем второго порядка точности для дифференциальных членов и при интегрировании. Размеры сетки подбирались с оценкой погрешности по правилу Рунге.

Результаты расчетов. Определены значения потерь теплоты с поверхности грунта по формуле $Q = \int_0^\sigma Bi \vartheta (R+1) dR$ (рис. 2) и аппроксимированы зависимостью $Q(\gamma, Bi) = 0,288\gamma + 1,166\sqrt{Bi\gamma}$ с максимальным отклонением $\Delta Q = \pm 0,6$ ($\delta Q = 5\%$) в диапазоне параметров $0 < \gamma \leq 16$ и $0 < Bi \leq 90$.

Полученная зависимость является приближенной оценкой в рамках ограниченности модели. Не учтено наличие полуограниченного пространства под грунтовым теплообменником и движение грунтовых вод. Результаты расчетов тепловых потерь представляют минимальную оценку, которая важна для практических расчетов.

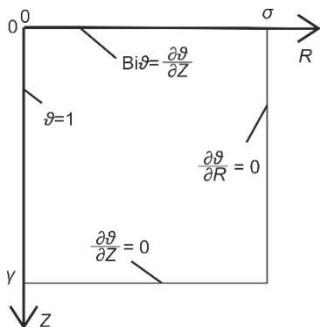


Рис. 1. Геометрическое представление расчетной области

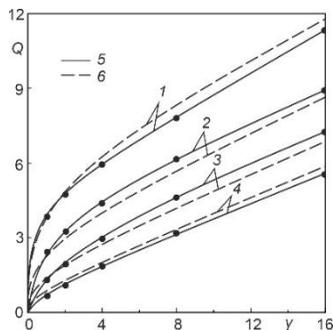


Рис. 2. Тепловые потери Q . 1 – $Bi = 90$, 2 – 9, 3 – 0,9, 4 – 0,09, 5 – расчетные данные, 6 – аппроксимация

Заключение. Представлены результаты решения задачи о потерях и притоках теплоты в грунтовых теплообменниках и аккумуляторах теплоты. Получены зависимости тепловых потерь от относительной глубины и радиуса теплообменника. Полученная аппроксимация может быть использована в расчетах грунтовых теплообменных систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, грант № МК-1456.2022.4.

Литература

1. Wang Z., Wang F., Liu J., Ma Z., Han E., Song M. Field test and numerical investigation on the heat transfer characteristics and optimal design of the heat exchangers of a deep borehole ground source heat pump system // *Energy Conversion and Management*, 2017, Vol. 153, pp. 603-615.
2. Luo J., Rohn J., Bayer M., Priess A., Wilkmann L., Xiang W. Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in Southern Germany // *Geothermics*, 2015, Vol. 53, pp. 57-66.
3. Boban L., Miše D., Herceg S., Soldo V. Application and Design Aspects of Ground Heat Exchangers // *Energies*, 2021, Vol. 14, pp. 2134.
4. Hein P., Kolditz O., Görke U.J., Bucher A., Shao H. A numerical study on the sustainability and efficiency of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems // *Applied Thermal Engineering*, 2016, Vol. 100, pp. 421–433.
5. Purdin M.S. Determination of the coefficient of effective thermal diffusivity of soil under natural changes in environmental conditions // *Agritech-VII, IOP Conf. Ser.: Earth Environ*, 2022, Vol. 1112, p. 012034.
6. Пурдин М.С., Гаряев А.Б. Численное моделирование естественной аккумуляции теплоты в грунте при сезонном промерзании // *Промышленная энергетика*, 2021, № 7, стр. 34-42.
7. Пурдин М.С., Цепляева Е.В. Определение значения коэффициента эффективной температуропроводности грунта в пассивном эксперименте // *Промышленная энергетика*, 2022, № 11, стр. 50-57.

8. Пурдин М.С. Метод численного моделирования теплообмена в аккумуляторах теплоты с множеством фаз и свободным перемещением фазовых границ // сб. докл. Х ЭТИП, Москва, 2020, с. 77-81.

9. Валуева Е.П., Пурдин М.С. Гидродинамика и теплообмен при пульсирующем с большими амплитудами ламинарном течении в каналах // Теплофизика и аэромеханика, 2018, № 5, с. 735-746.

10. Валуева Е.П., Пурдин М.С. Гидродинамика и теплообмен пульсирующего ламинарного потока в каналах // Теплоэнергетика, 2015, №9. с. 24-33.

11. Лыков А.В. Теория теплопроводности // М.: «Высшая школа», 1967, 600 с.

12. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики // М.: Издательство МГУ. 1999. 799 с.

УДК 621.9

А.А. АРБАТСКИЙ к.т.н,
Р.Э. МУРТАЗИН,
С.П. СУСЛОВ,
А.В. МАСЛОВ,
А.Г. АШИХМИН

НИИ «ИКСЭл» совместно с Национальный исследовательский университет «МЭИ»
E-mail: arbatskiy_a@nicssel.ru

Метод расчета естественной конвекции в стальных панельных радиаторах для оценки эффективности модернизации теплообменных поверхностей

Аннотация. На данный момент актуальной является задача модернизации конструкции различных отопительных приборов. Существующие массово-применяемые в России конструкции стальных-панельных радиаторов разработаны более 20-ти лет назад и практически не подвергались существенной модернизации. При этом не существует инженерных методик оценки эффективности применения тех или иных методов интенсификации теплообмена для подобных отопительных приборов. В данной работе предлагается, с использованием численного моделирования сформировать устойчивую расчетную модель для стальных-панельных радиаторов.

Ключевые слова: отопительные приборы, радиаторы, CFD моделирование, естественная конвекция, теплоотдача

А.А. ARBATSKII PhD,
R.E. MURTAZIN,
S.P. SUSLOV,
A.V. MASLOV,
A.G. ASHIHMIN

NII «IKSEL» feat National Research University
«Moscow Power Engineering Institute»
E-mail: arbatskiy_a@nicssel.ru

The method for calculating of natural convection in steel panel radiators to assess the efficiency of modernization of heat exchange surfaces

Abstract. At the moment, the problem of modernizing the design of various heating devices is very urgent. The existing mass-used in Russia steel panel radiators designs were developed more than 20 years ago and have not undergone modernization. At the same time, there are no engineering methods for evaluating the effectiveness of using certain methods of heat exchange intensification for such heating devices. In this research, it is proposed, using numerical modeling, to form a stable computational model for steel-panel radiators.

Key words: heating devices, radiators, CFD modeling, natural convection, heat transfer

Введение. Рассматриваем стандартный отопительный прибор «тип 22» размером 1000x500, конструкции представленной на рис.1. Конвективная лента радиатора имеет следующие параметры (рис. 2):

Из данных [1] тепловой поток от отопительного прибора при температуре окружающего воздуха 20С, температуре входа теплоносителя 85С, и температуре выхода теплоносителя 75 С (средняя температура 80С, разница температур между теплоносителем и окружающим воздухом составляет $\Delta t=60С$), составляет: 1,809 кВт. Данные подтверждены испытаниями в аккредитованной лаборатории, точность приведенных данных составляет 9% от величины теплового потока согласно п.5.4. [2], т.е. реальный тепловой поток будет находится в диапазоне 1,737 – 1,899 кВт.

Предлагается построить аналитическую модель расчета величины теплового потока от рассматриваемого отопительного прибора, с целью дальнейшей оценки эффективности тех или иных мероприятий по увеличению теплового потока через относительные величины.

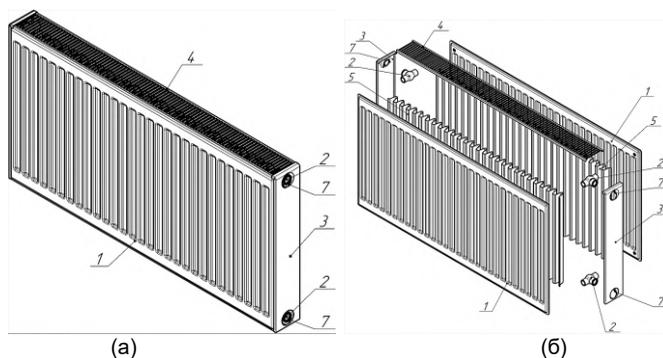


Рис.1 Конструкция стального-панельного радиатора «тип 22» в собранном виде – «а», и взрыв-схема – «б»: 1 – греющий элемент, 2 – распределительные трубки, 3 – боковые экраны, 4 – верхняя решетка, 5 – конвективная лента, 7 – отверстия для патрубков подведения теплоносителя

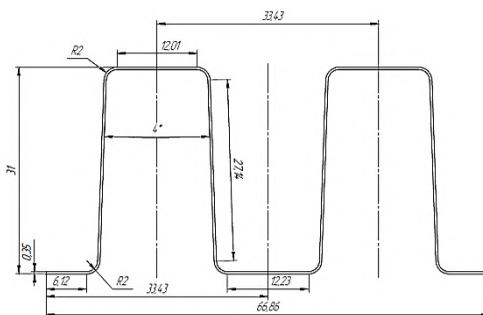


Рис. 2 Конвективная лента радиатора

Расчет теплоотдачи отопительного прибора через критериальные уравнения с применением численного моделирования. Произведем расчет теплоотдачи отопительного прибора по следующей методике:

$$Q = Q_{\text{вн}} + Q_{\text{внеш}} + Q_{\text{изл}} \quad (1)$$

где $Q_{\text{вн}}$ – количество тепла передаваемое конвекцией от внутренних поверхностей радиатора (при движении воздуха за счет естественной конвекции через конвективную ленту отопительного прибора), Вт; $Q_{\text{внеш}}$ – количество тепла передаваемое конвекцией от наружных поверхностей отопительного прибора, Вт; $Q_{\text{изл}}$ – тепло передаваемое излучением от наружных поверхностей отопительного прибора, Вт.

Излучение, передаваемое внутренним пространством отопительного прибора (области расположения конвективной ленты), не учитываем, так как внутренние поверхности замыкают его сами на себя.

Таким образом рассчитав каждую из составляющих можем понять общий тепловой поток. Наибольшую сложность представляет из себя расчет $Q_{\text{вн}}$ так как конвективное движение внутри отопительного прибора имеет довольно сложную структуру. Поэтому воспользуемся методом численного моделирования, применив специализированный программный комплекс и задав граничные условия 1-го рода, с применением двухслойной k - ϵ модели турбулентности [3] (данная модель турбулентности дает хорошие результаты при расчете теплообмена при течении в ограниченных каналах).

$$Q_{\text{вн}} = G c_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) \quad , \quad (2)$$

где G – расход воздуха движущегося за счет естественной конвекции, $\text{м}^3/\text{с}$; c_p – удельная изобарная теплоемкость воздуха при средней температуре внутреннего конвективного пространства отопительного прибора, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $t_{\text{вых}}$ – средняя температура выходящего воздуха из отопительного прибора, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{вх}}$ – средняя температура входящего воздуха в отопительный прибор (принимается по температуре окружающей среды $t_{\text{вх}} = t_{\text{окр}}$), $^{\circ}\text{C}$;

Для того, чтобы воспользоваться уравнением 2, необходимо произвести моделирование. Общий вид модели представлен на рис. 3:

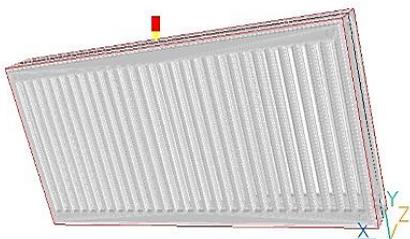


Рис. 3 Общий вид моделируемой области отопительного прибора

Вход воздуха происходит в нижней плоскости xz ($y=0$), параметры входа: температура – $t_{вх} = t_{окр} = 20\text{С}$, давление – атмосферное, размер - по границам отопительного прибора. Фактически свободный вход в нижнюю плоскость отопительного прибора.

Выход воздуха происходит в верхней плоскости xz ($y=500\text{ мм}$), по выпускной решетке, параметры выхода:

температура – по расчету, давление – по расчету, размер - по границам отопительного прибора. Фактически свободный выход в верхнюю плоскость отопительного прибора.

Источник тепла задается как постоянная температура (граничные условия 1-го рода) теплоносителя внутри панелей отопительного прибора, по средней температуре теплоносителя. Направление силы гравитации задается противоположным направлению оси «у».

Применяется двухслойная k - ϵ модели турбулентности [3]

Результаты моделирования, при средней температуре теплоносителя 80С представлены в табл. 1.

Таблица 1. Данные полученные в результате численного моделирования

Величина	Размерность	Значение
Температура выхода воздуха, $t_{в\text{ых}}$	С	54,71
Скорость выхода воздуха, v	м/с	0,222
Расход воздуха циркулирующего во внутреннем пространстве отопительного прибора, G	м ³ /с	0,0222

Внешний конвективный тепловой поток возможно посчитать из стандартного уравнения:

$$Q_{\text{внеш}} = \alpha F_{\text{конв}} (t_{\text{пов}} - t_{\text{окр}}) \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности отопительного прибора (рассчитывается из критериальных уравнений для естественной конвекции вдоль вертикальных поверхностей [4]), Вт/(м²К); F – площадь наружной поверхности отопительного прибора, м²; $t_{\text{пов}}$ – температура поверхности отопительного прибора (принимается как средняя температура теплоносителя внутри отопительного прибора, что вполне допустимо, так как коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха на два порядка меньше чем коэффициент теплоотдачи со

стороны теплоносителя. Термическим сопротивлением стенки можно пренебречь, так как оно составляет менее 1% от общего коэффициента теплопередачи), С;

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, с учетом того, что отопительный прибор находится в свободном конвективном поле, С

Расчет количества тепла передаваемого излучением производится следующим образом:

$$Q_{\text{изл}} = c_0 \varepsilon \left(\left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right) F_{\text{нар}} \quad (4)$$

где Т – соответствующие температуры в абсолютных значениях, К;

c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε – степень черноты поверхности отопительного прибора (принимаем 0,92).

Таким образом получаем:

Таблица 2. Итоговые данные расчета с использованием численной модели

Величина	Размерность	Значение
$Q_{\text{вн}}$	кВт	0,971
$Q_{\text{внеш}}$	кВт	0,434
$Q_{\text{изл}}$	кВт	0,529
Q	кВт	1,934
Заявленный тепловой поток отопительного прибора согласно [1], приведенный к $\Delta t=60\text{C}$ (разница между температурой теплоносителя и температурой поверхности радиатора)	кВт	1,809

Таким образом получаем расхождение рассчитанного с заявленным и подтвержденным лабораторными испытаниями тепловых потоков менее 9%, при попадании в диапазон допустимых тепловых мощностей, т.е. аналитическая модель расчета имеет удовлетворительную точность.

Заключение: Разработан численный метод для оценки полного теплового потока от отопительного прибора. Численный метод дает удовлетворительную сходимость с результатами натуральных испытаний (в пределах 9%), а также позволяет оценить тепловой поток от каждого элемента отопительного прибора, с целью дальнейшей оценки потенциала интенсификации теплоотдачи. Также возможен переход при оценке теплового потока от абсолютных величин к относительным, при получении данных для эталонного образца, что существенно повысит точность метода.

Литература

1. Данные производителей стальных-панельных радиаторов из открытого доступа
2. ГОСТ 31311-2005 «Приборы отопительные. Общие технические условия»
3. The PHOENICS 2019 Reference Manual (v.1.0)
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Тепло-передача. - М.: Энергия, 1975 г.

УДК 620.9:662.92.001.5

М.В. ПОЛЯКОВ, бакалавр,
С.К. ПОПОВ, д.т.н.

Национальный исследовательский университет "МЭИ"
111250 г. Москва, Красноказарменная улица 14
E-mail: mikle2000@mail.ru, popovsk@mpei.ru

Повышение эффективности использования природного газа в газотурбинных установках посредством термохимической рекуперации

Аннотация. Одним из наиболее перспективных методов повышения эффективности природного газа является рекуперация теплоты газовых отходов. Приведены результаты исследования математической модели газотурбинной установки с применением термической и термохимической рекуперации теплоты газовых отходов.

Ключевые слова: термохимическая рекуперация, газотурбинная установка, реактор конверсии, расход топлива, электрическая мощность, газовые отходы

M.V. POLYAKOV, Bachelor,
S.K. POPOV, Doctor of Engineering

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya St. 14
E-mail: mikle2000@mail.ru, popovsk@mpei.ru

Increasing the efficiency of natural gas use in gas turbine plants by means of thermochemical recovery

Abstract. One of the most promising methods for increasing the efficiency of natural gas is the recovery of waste gas heat. The results of mathematical model gas turbine plant study with the use of thermal and thermochemical heat recovery of gas waste are presented.

Key words: thermochemical recuperation, gas turbine plant, conversion reactor, fuel consumption, electric power, gas waste

Применение природного газа особо востребовано в энергетике для выработки тепловой и электрической энергии. Повышение эффективности использования природного газа в теплоэнергетической установке можно реализовать рекуперацией теплоты продуктов сгорания (газовых отходов) [1].

Рекуперативный подогрев природного газа или воздуха, подаваемого на горение, имеет ограничения и может привести к росту эмиссии NO_x [2]. Вместе с тем существует перспективный способ повышения эффективности использования природного газа – термохимическая рекуперация (ТХР) теплоты газовых отходов на основе конверсии (риформинга) природного газа. Вследствие эндотермической переработки природного газа новое топливо – синтез-газ – характеризуется более высокой теплотой сгорания (в пересчете на 1 м^3 исходного топлива), а

также значительным количеством H_2 и CO , сжигание которых сопровождается достаточно малой эмиссией NO_x .

В программной среде Aspen HYSYS с целью уточнения режимных параметров создана математическая модель газотурбинной установки (ГТУ) General Electric 9HA. Принято, что первичным топливом является метан – основной компонент природного газа. Исходные данные (по материалам от производителя ГТУ): степень сжатия в воздушном компрессоре $\pi_{к.в} = 21,8$; степень сжатия в газовом компрессоре $\pi_{к.г} = 21,8$; КПД газовой турбины – 93%. Дополнительно принято: КПД компрессоров – 80%; расход воздуха $G_{в.1} = 18000$ кг/ч; давление природного газа на выходе из компрессора – 2,3 МПа; продукты горения на выходе из КС находятся в состоянии термодинамического равновесия. В Aspen-модели использовано уравнение состояния Пенга – Робинсона, описывающее термодинамические параметры реальных газов и их смесей.

В процессе исследования Aspen-модели 1 установлен массовый расход топлива, обеспечивающий заданную производителем температуру газов на выходе из турбины, – $G_{топл.1} = 429,5$ кг/ч. Определены значения других режимных параметров. В частности, температура уходящих газов (на выходе из турбины) $t_{у.г.1} = 619$ °С и электрическая мощность нетто $W_{эл.1} = 2512,4$ кВт.

Разработана Aspen-модель 2 – ГТУ с системой термохимической рекуперации теплоты газовых отходов на основе паровой конверсии природного газа, представленная на рис. 1.

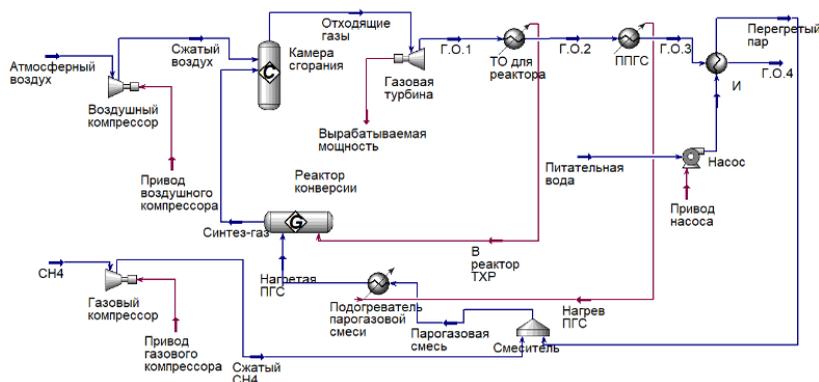


Рис. 1. Aspen-модель 2 (ГТУ с ТХР)

В исследовании модели принято, что температура парогазовой смеси на входе в реактор конверсии – 400 °С, температура синтез-газа – 583°С; расходы первичного топлива и воздуха такие же, как в базовом варианте: $G_{\text{топл.2}} = G_{\text{топл.1}} = 429,9$ кг/ч; $G_{\text{в.2}} = G_{\text{в.1}} = 18000$ кг/ч; удельный массовый расход пара $\beta = 1$ (кг пара)/(кг CH₄).

В результате исследования Aspen-модели 2 установлено: температура уходящих газов (за испарителем) $t_{\text{у.г.2}} = 515$ °С; электрическая мощность нетто $W_{\text{эл.2}} = 2729$ кВт.

Исследована схема ГТУ с термической рекуперацией теплоты газовых отходов на основе генерации пара (модель 3). Перегретый пар смешивается с продуктами горения в камере сгорания ГТУ. Выбраны следующие условия сопоставимости с другими моделями:

1) расходы первичного топлива и воздуха такие же, как в базовом варианте (модель 1) и в ГТУ с ТХР (модель 2):

$$G_{\text{топл.3}} = G_{\text{топл.2}} = G_{\text{топл.1}} = 429,5 \text{ кг/ч}; G_{\text{в.3}} = G_{\text{в.2}} = G_{\text{в.1}} = 18000 \text{ кг/ч};$$

2) величина β такая же, как в схеме ГТУ с ТХР (модель 2).

Установлено, что в данной схеме $t_{\text{у.г.3}} = 536$ °С, $W_{\text{эл.3}} = 2597$ кВт.

Рассмотрен еще один вариант ГТУ с термической рекуперацией – вариант 4, выбрав условием сопоставления с вариантом «ГТУ с ТХР» равенство $t_{\text{у.г.4}} = t_{\text{у.г.2}} = 515$ °С. Для реализации этого условия необходимо повысить расход питательной воды до уровня $G_{\text{п.в.4}} = 543$ кг/ч, чему соответствует $\beta = 1,264$. Величина $W_{\text{эл.4}} = 2619$ кВт, что на 110 кВт меньше, чем в цикле ГТУ с ТХР при такой же $t_{\text{у.г}}$.

На основе полученных результатов можно заключить, что схема ГТУ с ТХР дает наибольший эффект по сравнению с альтернативными вариантами, использующими термическую рекуперацию теплоты газовых отходов. Ожидаемый прирост выработки электрической мощности нетто по сравнению с базовым вариантом составляет 8,62%, удельный расход условного топлива снижается с 0,292 кг у.т/кВт·ч до 0,269 кг у.т/кВт·ч. Полученные результаты подтверждают целесообразность дальнейшей разработки задачи включения термохимической рекуперации в газотурбинный цикл.

Литература

1. Pashchenko, D. Natural gas reforming in thermochemical waste-heat recuperation systems: A review / D. Pashchenko // Energy. – 251 (2022) 123854. – DOI: 10.1016/j.energy.2022.123854.
2. Носач, В. Г. Повышение экономичности и экологических характеристик газотурбинных установок за счет термохимической регенерации / В. Г. Носач, А. А. Шрайбер // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т. 33. – № 1. – С. 46–50.

УДК 621.314.212: 62-714.711

Н.М. САВЧЕНКОВА, к.т.н.,
Р.Р. НАСЫРОВ к.т.н.,
А.И. СИМОНЕНКОВ студент,
Т.И. ХАЙРУЛЛИН студент

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14, стр. 1
E-mail: savchenkovanm@mpei.ru

Возможность применения пассивного охлаждения трансформаторов с использованием тепловых труб

Аннотация. Проведен обзор существующих систем охлаждения трансформаторов. Предложено использование испарительно-конденсационных устройств - тепловых труб, как наиболее эффективных устройств охлаждения. Произведен расчет технических характеристик аксиальных тепловых труб.

Ключевые слова: силовой трансформатор, система охлаждения, тепловая труба.

N.M. SAVCHENKOVA, Ph.D.,
R.R. NASYROV Ph.D.,
A. I. SIMONENKOV student,
T.I. KHAIRULLIN student

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
125080 Moscow, Volokolamskoe shosse 4
E-mail: savchenkovanm@mpei.ru

Possibility of using passive cooling of transformers with heat pipes

Abstract. A review of the existing transformer cooling systems was carried out. The use of the evaporative-condensing devices - heat pipes, as the most efficient cooling devices, is proposed. The calculation of the technical characteristics of the heat pipes has been made.

Key words: power transformer, cooling system, heat pipe.

На электрической подстанции существует большое количество потребителей собственных нужд, которые включают в себя электродвигатели системы охлаждения мощных силовых трансформаторов [1]. Электродвигатели представляют собой насосы и вентиляторы, которые создают циркуляцию и охлаждение трансформаторного масла. Отключение охлаждающих вентиляторов и насосов даже на короткий промежуток времени вынуждает отключать трансформатор от сети вследствие его перегрева, а, следовательно, отключать питание нижестоящего за ним потребителя. Это может вызвать не только аварию на подстанции, но и понести большой экономический ущерб от недоотпуска электроэнергии и отключения ответственных потребителей. В данной статье предлагается возможный вари-

ант замены существующей системы охлаждения ДЦ трансформаторов на систему с использованием тепловых труб.

При работе трансформатора температура нагрева активных частей трансформатора не должна превышать предельно допустимый нагрев относительно окружающей среды. В ходе исследования рассмотрен трансформатор высокой мощности типа ТРДЦН-80000/110, для охлаждения которого применяется принудительная циркуляция и обдув масла за счет маслососов и воздушных вентиляторов. Чтобы рассчитать параметры системы охлаждения, необходимо провести тепловой расчет трансформатора, зная конструкции обмоток, их материалы, строение магнитопровода, габариты и материалы изоляции.

В ходе расчета приняты обмотки, наиболее часто используемые для трансформаторов данного типа, а также рассчитаны их поверхностные удельные потери: обмотки низшего и высшего напряжения, регулировочная обмотка. Для определения суммарных потерь в трансформаторе, необходимо рассчитать потери короткого замыкания и холостого хода.

Полные потери трансформатора рассчитываются по формуле:

$$P_{\text{расч}} = 1,1(P_{\text{Х.Х.}} + P_{\text{К}}) \quad (1)$$

Также необходимо рассчитать, сколько тепла отводит поверхность бака за счет конвекции и излучения. Для этого, превышение нагрева масла над воздухом:

$$Q_{\text{ср.м}} = \frac{Q_{\text{верхн.сл.м}}}{1,2 \cdot K_{\text{ц}}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{верхн.сл.м}} = 60^{\circ}\text{C}$ - максимальное превышение верхних слоев масла, $K_{\text{ц}}$ - геометрический коэффициент расположения центров

Тогда тепловая нагрузка бака:

$$q_{\text{Б}} = \left(\frac{Q_{\text{ср.м}}}{0,262}\right)^{1,25} \quad (3)$$

Окончательно поток тепла, отводимый поверхностью бака путем излучения и конвекции:

$$Q_{\text{Б}} = q_{\text{Б}} \left(H_{\text{Б}} \cdot \Pi_{\text{Б}} + \left(2 \cdot D_{\text{МО}} \cdot B_{\text{Б}} + \frac{\pi \cdot B_{\text{Б}}^2}{4} \right) \cdot 0,75 \right), \quad (4)$$

где $H_{\text{Б}}$; $\Pi_{\text{Б}}$; $B_{\text{Б}}$; $D_{\text{МО}}$ - высота бака, периметр бака, ширина бака и межосевой промежуток обмоток соответственно (габаритные величины).

При выполнении расчета трансформатора типа ТРДЦН-80000/110 потери холостого хода и короткого замыкания суммарно с учетом потока тепла, отводимого поверхностью определяют количество тепла необходимое для отвода системой охлаждения:

$$Q_{\text{охл}} = P_{\text{расч}} - Q_{\text{Б}} \approx 340 \div 350 \text{ кВт} \quad (5)$$

Это количество тепла должно быть отведено системой охлаждения, в частности, предлагаемой для дальнейшего расчета системой на базе тепловых труб.

Для определения теплопередающих и геометрических характеристик одиночной тепловой трубы решается следующая система уравнений [3-4], которая описывает процессы передачи тепла от трансформатора к стенке тепловой трубы, через стенку, через пористую структуру тепловой трубы, фазовый переход теплоносителя в испарителе, фазовый переход теплоносителя в конденсаторе, и далее, через пористую структуру и стенку - в окружающую среду:

$$Q = \frac{\lambda_{ст}}{\delta_{ст}} \cdot F_{наруж} \cdot (t_{внеш}^и - t_{внутр}^и) \quad (6)$$

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_{эф}}{\lambda_{эф}}} \cdot F_{внутр} \cdot (t_{внутр}^и - t_s) \quad (7)$$

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_k} + \frac{\delta_{эф}}{\lambda_{эф}}} \cdot F_k \cdot (t_s - t_{внутр}^к) \quad (8)$$

$$Q = \lambda_{ст} \cdot F_k \cdot (t_{внутр}^к - t_{внеш}^к) \quad (9)$$

$$Q = \alpha_{возд} \cdot F_k \cdot (t_{внеш}^к - t_{возд}) \quad (10)$$

Материала, из которого изготовлена тепловая труба, алюминий, теплоноситель – аммиак.

После определения конструкции системы охлаждения на базе тепловых труб необходимо рассмотреть возможные варианты ее установки. Прежде всего, при установке рассматриваемой системы охлаждения, должны соблюдаться допустимые механические нагрузки, электродинамическая стойкость и допустимое расстояние от фазных вводов для предотвращения перекрытия. По итогам работы сделан вывод о целесообразности использования тепловых труб для систем охлаждения силовых масляных трансформаторов.

Литература

1. Старшинов В.А., Пираторов М.В., Козина М.А. Электрическая часть электростанций и подстанций: учебное пособие / под ред. В.А. Старшинова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2015. - 296 с.
2. Васильев Л.Л., Вааз С.Л., Киселев В.Г., Конев С.В., Гракович Л.П. Низкотемпературные тепловые трубы. - Минск: Наука и техника, 1976. - 136 с.
3. Шелгинский А.Я. Тепловые трубы в системах теплоснабжения и утилизации ВЭР: учебное пособие – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 60 с.
4. Чи С. Тепловые трубы: теория и практика / Пер. с англ. В. Я. Сидорова. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.

УДК 66.042.88

М.С. ПУРДИН, к.т.н., доцент
Р. МАГОМЕДОВА, студент

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.17, В-104
E-mail: PurdinMS@mpei.ru, MagomedovaR@mpei.ru

Численное моделирование теплообмена в водяном микроканальном пластинчатом аккумуляторе теплоты с воздушным теплоносителем

Аннотация. В работе представлены результаты численного моделирования теплообмена в водяном микроканальном пластинчатом аккумуляторе теплоты с воздушным теплоносителем

Ключевые слова: аккумулятор теплоты, регенерация теплоты, сопряженный теплообмен.

M.S. PURDIN, Ph.D.,
R. MAGOMEDOVA, student

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya street, 17, V-104
E-mail: PurdinMS@mpei.ru, MagomedovaR@mpei.ru

Numerical modeling of heat transfer in a water microchannel plate heat accumulator with air coolant

Abstract. The paper presents the results of numerical simulation of heat transfer in a water microchannel plate heat accumulator with an air coolant.

Key words: heat accumulator, heat recovery, conjugate heat transfer.

Введение. Различные авторы предлагают использовать аккумуляторы теплоты для повышения эффективности работы инженерных систем, например, вентиляции. Наиболее перспективным является применение фазопереходных, жидких и твердых теплоаккумулирующих материалов. Ряд работ направлен на получение аналитических решений задач о фазопереходных аккумуляторах теплоты [1, 2]. В работе [3] представлен безусловно устойчивый численный метод решения задач о фазовом переходе, который позволил решить задачу о промерзании грунта [4], и может быть использован для расчета фазопереходных аккумуляторов. Однако их применение ограничено в связи с необходимостью специального подбора дорогих аккумулирующих материалов. В качестве теплоаккумулирующего материала хорошо подходит вода из-за ее высокой теплоемкости. Интерес представляет применение микроканальных аккумуляторов теплоты, имеющих большую площадь теплообмена, в системах воздухообмена. Микроканальные теплообменники отличаются наличием ламинарного и, часто, пульсирующего ре-

жима течения. Подобное движение теплоносителя имеет свои особенности, что было исследовано в работах [5, 6].

Постановка задачи. Рассмотрим задачу теплообмена микроканальном пластинчатом аккумуляторе теплоты с воздушным теплоносителем. Аккумулирующим агентом является неподвижная вода, заключенная в тонкостенные пластины. Уравнение теплопередачи [7] принимает следующий безразмерный вид:

$$F_T \frac{\partial \vartheta}{\partial t_\omega} + \frac{Pe}{4} U \frac{\partial \vartheta}{\partial X} = \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial Y^2}, \quad (1)$$

где $F_T = y_0^2 \omega / a$ – безразмерная тепловая частота колебаний; a – температуропроводность, m^2/c ; $Pe = RePr$ – число Пекле; Pr – число Прандтля; $Re = v d_f / \nu$ – число Рейнольдса; $d_f = 4y_0$ – гидравлический диаметр плоского канала, м; $t_\omega = t\omega$ – безразмерное время; t – время, с; $U = v / \langle v \rangle$ – безразмерная продольная скорость воздуха; v – продольная скорость воздуха, м/с; $X = x / y_0$ и $Y = y / y_0$ – безразмерные продольная и поперечная координаты; x и y – продольная и поперечная координаты, м; y_0 – полувысота канала, м. $\vartheta = (T - T_{cp}) / A_T$ – безразмерная температура; T , T_{cp} и A_T – температура воздуха, средняя температура и амплитуда колебаний температуры теплоносителя на входе в аккумулятор теплоты, К; v – кинематическая вязкость, m^2/c ; ω – круговая частота, $1/c$; $\langle \rangle$ – знак осреднения по сечению.

Профиль скорости в плоском канале задан $U = 1,5(1 - Y^2)$. Геометрическое представление расчетной области с граничными условиями в безразмерном виде представлены на рис. 1. Координата $\sigma = y_1 / y_0$ соответствует относительному шагу пластин аккумулятора теплоты, где y_1 – расстояние между центром канала и центром теплоаккумулирующей пластины, м. Длина канала задана равной двум длинам начального теплового участка ($X_{нт\gamma} = 0,11Pe$ для граничного условия первого рода).

Задача решена методом конечных разностей [8] с применением безусловно устойчивых схем второго порядка точности для дифференциальных членов в правой части уравнения (1) и первого порядка – для левой. Полученная система линейных уравнений решается редуцированным методом Гаусса. Размеры сетки подбирались с оценкой погрешности по правилу Рунге.

Результаты расчетов. На рис. 2 представлены результаты расчета распределения безразмерной температуры в пластине аккумулятора теплоты и в канале при $F_{T\text{вод}} = 1$ для воды и, соответственно, $F_{T\text{возд}} = 6,67 \cdot 10^3$ для воздуха. Воздух имеет большую температуропроводность, чем вода, поэтому для большой области частот колебаний температуры воздух имеет квазистационарный режим. Изменение числа Пекле не оказывает влияния в пределах двух длин начальных тепловых участков.

УДК 536.21+537.6+621.3.089.2

Ю.А. КИРСАНОВ¹, д.т.н.
А.Ю. КИРСАНОВ², к.т.н.

¹ Институт энергетики и перспективных технологий,
ФИЦ Казанский научный центр РАН,
420111 г. Казань, Россия

² ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ)
420111 г. Казань, Россия

E-mail: kirsanov-yury@mail.ru, akirsanov@list.ru

О теплопереносе в твердом теле

Аннотация. Рассмотрены физические основы теплопереноса и современные математические модели теплопроводности в твердом теле. На основе выдвинутой ранее гипотезы об электрон-фотонной природе теплопроводности твердого тела дается объяснение причин и механизмов явлений тепловой релаксации и термического демпфирования, как составных частей процесса теплопроводности.

Ключевые слова. Теплопроводность, анизотропия, электрон-фотонный теплоперенос, тепловая релаксация, термическое демпфирование.

Yu. A. KIRSANOV¹, Doctor of Engineering
A.Yu. KIRSANOV², Doctor of Philosophy

¹ Institute of Power Engineering and Advanced Technologies of FRC
Kazan Scientific Center of RAS,
Kazan, 420111 Russia.

² Kazan National Research Technical University named after Tupolev—KAI,
Kazan, 420111 Russia

E-mail: kirsanov-yury@mail.ru, akirsanov@list.ru

On heat transfer in solids

Abstract. The physical foundations of heat transfer and modern mathematical models of heat conduction in solids are considered. On the basis of the previously put forward hypothesis about the electron-photon nature of the thermal conductivity of a solid, an explanation is given of the causes and mechanisms of the phenomena of thermal relaxation and thermal damping, as components of the thermal conductivity process.

Key words. Thermal conductivity, anisotropy, electron-photon heat transfer, thermal relaxation, thermal damping.

Внутренняя энергия твердого тела по П. Дебаю [1] складывается из энергии теплового движения *свободных электронов* и колебаний узлов кристаллической решетки, излучающих кванты ультразвуковых волн, названных позднее *фононами*. Эти предположения легли в основу *электрон-фононной* теории [2]: теплопроводность тела λ является результатом переноса внутренней энергии свободными электронами,

названного *электронной* теплопроводностью λ_e , и переноса фононами λ_{lat} , названной *решеточной* теплопроводностью:

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_{lat}.$$

Математическое моделирование теплопроводности ведет отсчет от работы Ж. Фурье [3], в которой плотность теплового потока q связана с градиентом температуры T :

$$q = -\lambda \text{ grad } T, \quad (1)$$

Формулу (1), блестяще подтвержденную на практике в стационарных и квазистационарных процессах, часто называют *законом Фурье*.

Недостатком модели (1) является пренебрежение влиянием на переходные процессы конечной скорости теплопереноса и термического демпфирования. Модификацией модели (1), устраняющий этот недостаток, является модель Максвелла-Каттанео-Лыкова (МКЛ) [4]:

$$q + \tau_q \frac{\partial q}{\partial t} = -\lambda \text{ grad } \left[T + \tau_T \frac{\partial T}{\partial t} \right]. \quad (2)$$

Здесь τ_q и τ_T – параметры, называемые временами *тепловой релаксации* и *термического демпфирования*, с. Адекватность модели (2) подтверждена путем описания опытного переходного термического процесса в полиметилметакрилате с определением параметров: $\tau_q \approx \tau_T \approx 1,5$ с [5].

Насколько реалистична электрон-фононная модель Дебая? Правильность постановки вопроса обусловлена тем, что эта модель не рассматривает возможность теплопереноса электромагнитным излучением, на практике реализуемого в лазерах и мазерах. О ее несостоятельности свидетельствует так же невозможность объяснения с позиций этой модели обнаруженной анизотропии теплопроводности постоянного магнита при разной ориентации магнитных силовых линий относительно вектора теплового потока (рис. 1) [6].

Устранить противоречия между моделью и реальностью оказалось возможным с помощью *электрон-фотонной* модели теплопроводности [4, 6]:

- теплопроводность твердого тела обусловлена электрон-фотонным теплопереносом, то есть теплопроводность складывается из теплопереноса свободными электронами λ_e и теплопереноса *фотонами*, излучаемыми орбитальными электронами атомов (ионов) кристаллической решетки λ_{ph} :

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_{ph};$$

- теплоперенос свободными электронами изотропен и не зависит от направления магнитных силовых линий;

- орбитальные электроны, вращаясь вокруг ядра, в соответствии со вторым постулатом Бора поглощают и излучают кванты электромагнитного излучения (фотоны) в виде цуга электромагнитной волны в направлении вектора Умова-Пойнтинга $[\mathbf{E} \times \mathbf{H}]$ так, что плоскость поляризации

электромагнитной волны \mathbf{H} проходит через орбитальный магнитный момент электрона \mathbf{M}_e а плоскость колебаний электрического поля \mathbf{E} совпадает с плоскостью вращения орбитального электрона (рис. 2).

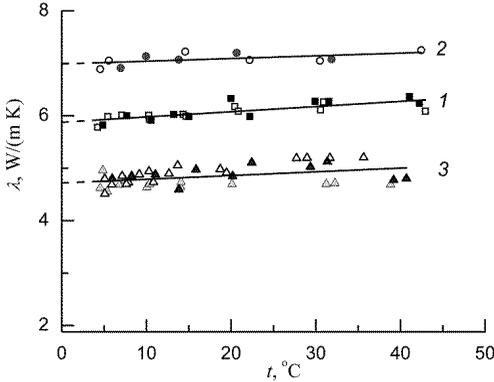


Рис. 1. Теплопроводность образцов постоянного магнита из $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ [6]: 1 – магнитное поле отсутствует; 2 и 3 – остаточная намагниченность $B = 1,2$ Тл; 2 – магнитные силовые линии ортогональны тепловому потоку; 3 – то же параллельны.

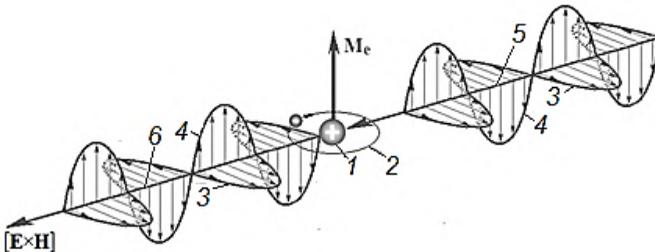


Рис. 2. Поглощение и излучение кванта электромагнитной волны орбитальным электроном: 1 – ядро атома; 2 – орбита электрона; 3 – плоскость колебаний \mathbf{E} электромагнитной волны; 4 – плоскость поляризации \mathbf{H} ; 5 – цуг (квант) падающей электромагнитной волны; 6 – то же излучаемой орбитальным электроном

Согласно предложенной электрон-фотонной модели анизотропия теплопроводности тела в магнитном поле является следствием прецессии орбитального магнитного момента \mathbf{M}_e под углом γ относительно вектора индукции \mathbf{B} внешнего по отношению к атому магнитного поля (рис. 3). Вместе с вектором \mathbf{M}_e прецессию совершает и вектор Умова-Пойнтинга $[\mathbf{E} \times \mathbf{H}]$, определяющий направление луча (кванта) излучаемой электромагнитной волны. Поэтому квант излучается в пределах конуса с углом γ при вершине и осью, ортогональной вектору \mathbf{B} . Результатом прецессии векторов \mathbf{M}_e и $[\mathbf{E} \times \mathbf{H}]$ при $\gamma < \pi/2$ является преимущественный теплоперенос фотонами в направлении оси x , ортогональной

вектору \mathbf{B} , и, как следствие, – более высокие значения коэффициентов теплопроводности λ_{ph} и λ в этом направлении.

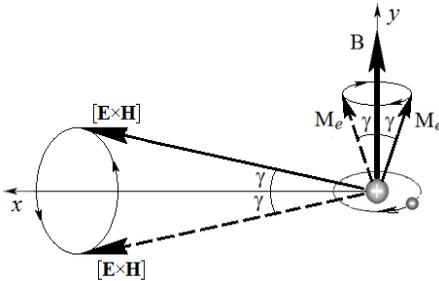


Рис. 3. Прецессия орбитального магнитного момента \mathbf{M}_e относительно вектора индукции внешнего магнитного поля \mathbf{B} и вращение луча электромагнитной волны

Расчеты показали: у исследованных образцов магнита $\gamma = 41.3^\circ$; вклад в теплопроводность теплопереноса свободными электронами, то есть λ_e , при 0°C составляет в отсутствии магнитного поля около 40 %; вдоль магнитных силовых линий около 50 % и, примерно, 34 % – поперек силовых линий [6]. С усилением магнитного поля из-за уменьшения угла прецессии γ анизотропия тела усиливается, что сопровождается увеличением доли теплопереноса свободными электронами λ_e вдоль магнитных силовых линий и снижением в поперечном силовым линиям направлении. По мере ослабления внешнего магнитного поля угол прецессии возрастает, что приводит к ослаблению анизотропии теплопроводности. При снижении индукции внешнего поля B до значений, соизмеримых со значением орбитального магнитного момента M_e прецессия последнего прекращается, положение в пространстве векторов \mathbf{M}_e становится неопределенным (хаотичным) и теплопроводность тела становится изотропной.

Итак, по электрон-фотонной модели носителями избыточной внутренней энергии в твердом теле являются свободные электроны и фотоны. Эти носители обладают существенно различными характеристиками: фотоны распространяются со скоростью света, а свободные электроны, образующие электронный газ, – со скоростью звука [7]. Электронный газ, обладающий упругими и инерционными свойствами, способствует тепловой релаксации и тем значительнее, чем большая доля теплопроводности тела приходится на λ_e . Поэтому увеличение вклада свободных электронов в теплопроводность тела способствует росту значения параметра τ_q . Благодаря высокой скорости фотонов происходит сглаживание температуры, препятствующее колебательному процессу в объеме тела, то есть осуществляется термическое демпфирование. Поэтому с ростом доли теплопереноса фотонами значения параметра τ_T повышается.

Обнаруженное в работе [6] воздействие магнитного поля на анизотропию теплопроводности тела, влияющей на механизмы теплопереноса по отдельным направлениям, может быть применено на практике, как для оптимизации коэффициента теплопроводности, так и для регулирования теплорелаксационных и термодемпфирующих свойств твердых тел.

Литература

1. Debye P. Zur Theorie der spezifischen Warmen, Ann. Phys. 1912. Bd 30. S. 789.
2. Kittel C. 2005. Introduction to Solid State Physics 8th edn (New York: John Wiley & Sons)
3. Fourier J.B.J. Theorie analytique de la chaleur. Paris, 1822.
4. Кирсанов Ю.А. Моделирование теплофизических процессов. С. Петербург: Политехника, 2022. 231 с.
5. Кирсанов Ю.А., Кирсанов А.Ю., Юдахин А.Е. Метод измерения тепловой релаксации в твердом теле // ТВТ. 2018. Т. 56. № 3. С. 446-454.
6. Кирсанов Ю.А., Кирсанов А.Ю. Теплопроводность однородного тела в магнитном поле // ТВТ. 2022. т. 60. № 2. С. 191-197. // <https://rdcu.be/c6bVK>
7. Измайлов С.В. Курс электродинамики. М.: Учпедгиз, 1962. 439 с.

УДК 66.021.3/4

Е.А. ЛАПТЕВА, к.т.н., доцент,
А.Г. ЛАПТЕВ, д.т.н., профессор

¹ Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Республика Татарстан
tvt_kgeu@mail.ru

Методы моделирования эффективности теплообмена в пленочных градирнях с интенсификаторами

Аннотация: Представлена математическая модель и результаты экспериментальных исследований трубчатой насадки с поверхностными интенсификаторами на макете пленочной градирни. Получена тепловая эффективность и даны результаты расчетов по математической модели.

Ключевые слова: градирня, эксперимент, математическая модель, тепловая эффективность.

E.A. LAPTEVA, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
A.G. LAPTEV, Doctor of Technical Sciences, Professor

¹ Kazan State Power Engineering University
Kazan, Republic of Tatarstan
tvt_kgeu@mail.ru

Methods of modeling the efficiency of heat and mass transfer in film cooling towers with intensifiers

Abstract: A mathematical model and the results of experimental studies of a tubular nozzle with surface intensifiers on a model of a film cooling tower are presented.

The thermal efficiency is obtained and the results of calculations based on a mathematical model are given.

Key words: cooling tower, experiment, mathematical model, thermal efficiency.

От интенсивности взаимодействия воды и воздуха в блоках оросителей (регулярных насадках) противоточных градирен зависит эффективность теплообмена и температура оборотной воды на промышленных предприятиях и тепловых станциях. Разработка или модернизация контактных устройств в блоках оросителей предполагает как математическое, так и физическое моделирование процесса охлаждения воды. Методы математического моделирования подразделяются на точные, асимптотические, численные и приближенные. Численные модели связаны с решением на ЭВМ системы дифференциальных уравнений переноса с частными производными, а приближенные с применением моделей пограничного слоя и структуры потоков. В расчетах промышленных градирен чаще применяются приближенные математические модели и экспериментальные исследования. При условиях идеального вытеснения воздуха и воды высота насадки находится из уравнения теплового баланса и теплопередачи, где с применением подхода Меркеля и аналогии Льюиса применяется объемным коэффициентом массоотдачи β_{XV} ($\text{кг}/(\text{м}^3\text{с})$), отнесенный к влагосодержанию воздуха. Такой подход является приближенным и широко применяется в расчетах градирен с принятыми допущениями. Однако при разработке и применении контактных устройств с поверхностными интенсификаторами (выступы, просечки, лунки, накатки, гофры и др.) [1] за счет повышения интенсивности турбулентности и геометрических особенностей насадок усиливается обратное перемешивание потоков воды и воздуха, которые снижают движущую силу теплообмена и тепловая эффективность будет ниже чем в расчетах по модели идеального вытеснения. Эти явления необходимо учитывать в расчетах промышленных градирен. Для учета обратного перемешивания Hartland S. и Mecklenburgh J. предложили в выражении для расчета высоты насадки методом единиц переноса использовать полуэмпирические поправки в виде отношения коэффициентов обратного (продольного) перемешивания к средней скорости фаз. Тогда высота насадки H будет вычисляться по зависимости

$$H = \left(\frac{G}{\beta_{XV} S_k} + b_r \frac{D_{ПГ}}{w_r} + b_{ж} \frac{D_{ПЖ}}{u_{ж}} \right) \frac{I_k - I_H}{\Delta I_{cp}}, \quad (1)$$

где G – массовый расход воздуха, $\text{кг}/\text{с}$; S_k – площадь поперечного сечения градирни в зоне в насадкой, м^2 ; I_H , I_k – начальное и конечное значения энтальпий воздуха, $\text{Дж}/\text{кг}$; ΔI_{cp} – средняя движущая сила в

виде разности энтальпий, Дж/кг; $D_{\text{пр}}$, $D_{\text{тж}}$ – коэффициенты обратного перемешивания по газовой и жидкой фазам, м²/с; w_r , $u_{\text{ж}}$ – средние скорости газа и воды, м/с; b_r , $b_{\text{ж}}$ – эмпирические коэффициенты.

Выражение (1) удобнее применять в модифицированными числами Пекле (Боденштейна) из теории структуры потоков. Тогда имеем

$$H = \left[\frac{G}{\beta_{\text{хв}} S_{\text{к}}} + d_{\text{э}} (b_r Pe_{\text{эг}}^{-1} + b_{\text{ж}} Pe_{\text{эж}}^{-1}) \right] \frac{l_{\text{к}} - l_{\text{н}}}{\Delta l_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где $Pe_{\text{эг}} = w_r d_{\text{э}} / D_{\text{пр}}$; $Pe_{\text{эж}} = u_{\text{ж}} d_{\text{э}} / D_{\text{тж}}$ – числа Пекле обратного перемешивания потоков; $d_{\text{э}} = 4\epsilon_{\text{св}} / \alpha_{\text{в}}$ – эквивалентный диаметр насадки, м.

В выражении (2) отношение высоты насадки H к квадратной скобке есть модифицированное значение числа единиц переноса с учетом обратного перемешивания потоков, т.е.

Для идентификации числовых коэффициентов b_r и $b_{\text{ж}}$ в выражении (2) выполнены экспериментальные исследования регулярной насадки из полиэтиленовых труб диаметром 50 мм с дискретно-регулярной шероховатостью поверхности в виде прямоугольных выступов. Трубы располагаются вертикально при плотной упаковке (без деформации) и имеют удельную поверхность $\alpha_{\text{в}} = 110 \text{ м}^2/\text{м}^3$. На макете градирне с внутренним диаметром 190 мм разместилось 10 труб. Высота насадки один метр. Исследовалось охлаждение воды с начальной температурой 35-38 °С окружающим воздухом. Плотность орошения $q_{\text{ж}} = 8,8 - 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$ и скорость воздуха в колонне $w_r = 0,7 - 2,6 \text{ м/с}$. Экспериментально измерялись расходы фаз, температуры, влагосодержание на входе и выходе, а также перепад давления. После обработки опытных данных получены значения объемных коэффициентов массоотдачи, которые сравнивались с другими насадками [2]. Также получены значения тепловой эффективности по газовой E_r и жидкой $E_{\text{ж}}$ фазам (рис. 1,2).

$$N_r^* = H \left[\frac{G}{\beta_{\text{хв}} S_{\text{к}}} + d_{\text{э}} (b_r Pe_{\text{эг}}^{-1} + b_{\text{ж}} Pe_{\text{эж}}^{-1}) \right]^{-1}. \quad (3)$$

Тогда, имея значение N_r^* , можно использовать известное выражение тепловой эффективности для идеального вытеснения газа, где влияние обратного перемешивания учитывается числами Пекле

$$E_T = 1 - \exp(-N_T'). \quad (3)$$

В результате сравнения тепловой эффективности E_T по газовой фазе с применением модели идеального вытеснения $E_T = 1 - [\exp(-\beta_{XV}HS_K / G)]$ и полученных значений E_T экспериментально установлены эмпирические коэффициенты $b_{ж} \approx b_T \approx 35,8 / \text{Re}_{ж}^{0,66}$, где $\text{Re}_{ж} = 4q_{ж} / \nu_{ж}$; $\nu_{ж}$ – коэффициент кинематической вязкости воды, $\text{м}^2/\text{с}$; $q_{ж} \sim \text{м}^3/(\text{м}^2\text{с})$.

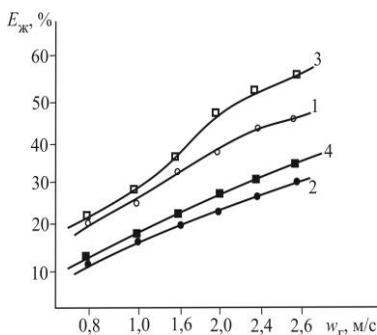


Рис. 1. Зависимость эффективности охлаждения воды от скорости воздуха. Обозначения на рис. 1.

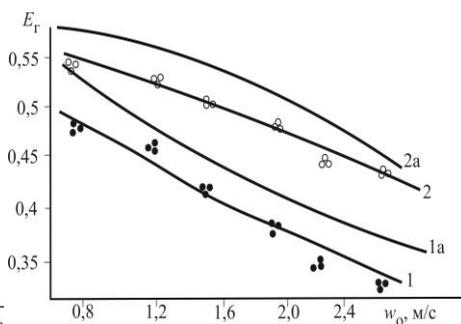


Рис. 2/ Зависимость тепловой эффективности в воздушной фазе от скорости воздуха
 1 – $q_{ж} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 2 – $q_{ж} = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$. Точки экспериментальные данные; сплошные линии – расчет по выражению (4); 1a, 2a – расчет по модели идеального вытеснения

Из эксперимента и расчетов (рис.2) можно сделать вывод, что не учет обратного перемешивания воздуха и воды в пленочной градирне может привести к ошибке определения эффективности теплообмена на 8-15%.

Литература

1. Витковская Р.Ф., Пушков А. С., Шинкунас С. Аэродинамика и теплообмен насадочных аппаратов. – Санкт – Петербург: Лань, 2019. 288 с.
2. Лаптев А.Г., Лаптева Е.А. Теор. осн. хим. технол. 55. 5, 594–601 (2021)

УДК 628.474.55:004.94

А.А. АХМЕД, аспирант
Р.С. РАМАЗАНОВ, к.т.н.,
П.А. ТРУБАЕВ, д.т.н.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
308012, Белгород, ул. Костюкова, 46
E-mail: ashraf.a.ahmed@tu.edu.iq

Моделирование горения твердого топлива на колосниковой решетке в программном комплексе ANSYS FLUENT

Аннотация. В работе представлен подход к моделированию процессов горения твердого топлива на колосниковой решетке в котле малой мощности в программном комплексе Ansys Fluent. Описаны применяемые методы для построения геометрии и сетки, выбора применяемых моделей и параметров.

Ключевые слова: колосниковая решетка, твердое топливо, ТКО, моделирование, ANSYS Fluent

A.A. AHMED, graduate student
R.S. RAMAZANOV, PhD
P.A. TRUBAEV, DSc

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Russia, 308012, Belgorod, Kostyukov St. 46,
ashraf.a.ahmed@tu.edu.iq

Simulation of solid fuel combustion on a grate in the ANSYS FLUENT software complex

Abstract. The paper presents an approach to modeling the processes of solid fuel combustion on a grate in a low-power boiler in the Ansys Fluent software package. The applied methods for constructing geometry and grids, the choice of applied models and parameters are described.

Key words: grate, solid fuel, MSW, computer modelling, ANSYS Fluent

Основная концепция и подход данного исследования заключается в моделировании сжигания твердого топлива, такого как древесные отходы и твердые коммунальные отходы, и их преобразования в тепловую энергию. Для решения задач моделирования горения слоя твердого топлива с помощью программного комплекса ANSYS Fluent исследователи используют следующие приёмы и способы: 1) топливо представляют в виде твёрдых сферических частиц, свободно движущихся на колосниковой решетке, в которых происходят следующие процессы: прогрев, испарение влаги, воспламенение и горение летучих веществ, выгорание коксового остатка [1]; 2) слой топлива представляют в форме объема пористой структуры [2]; 3) горение топлива в слое рассматривают отдельно от газодинамических процессов, а параметры продуктов горения используются в качестве входных условий для области над топливом [3].

Известные исследования об особенностях совместного сжигания угля и других видов биомассы в тепловых котлах малой мощности [4]. Кроме того, авторы пришли к выводу, что совместное сжигание в различных горелках сильно влияет на конвекцию стенок котла, что приводит к некоторому увеличению выбросов CO_2 и NO_x [5]. С помощью компьютерного моделирования исследовано влияние углекислого газа и паров воды на реакционную способность и кинетическое поведение гранул из рисовой соломы и сырых опилок при сжигании с кислородом [6]. Как правило, при сжигании RDF-топлива стабильность горения обеспечивается использованием кислородного дутья или вводом дополнительного топлива [7].

Таким образом, научный интерес вызывает изучение влияния на процесс работы котельных установок свойств сжигаемого топлива. Работа посвящена моделированию процесса горения твердого топлива из отходов на колосниковой решетке. Целью работы является определение температуры горения твердого топлива исследуемого состава, температуры поверхности котельной установки, концентраций угарного газа и оксида углерода в продуктах сгорания.

Первым этапом исследования является разработка геометрической модели, отвечающей схеме работы котельной установки малой мощности на твердом топливе с колосниковой решёткой (рис. 1). На основе данной схемы построена трёхмерная геометрическая модель, размеры которой составляют длина $L = 2,8$ м, высота $H = 2,6$ м, глубина $W = 0,74$ м. В качестве материала корпуса котельной установки принят теплоустойчивый шамот со следующими характеристиками: химическая формула $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$, плотность $\rho = 900$ кг/м³, массовая удельная теплоёмкость $c_p = 1100$ Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности $\lambda = 1,2$ Вт/(м·К).

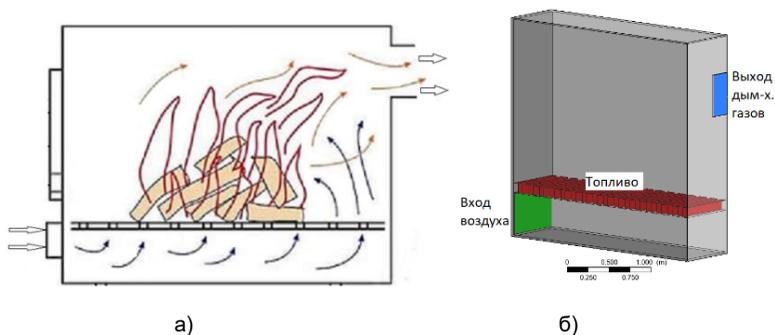


Рис. 1. Схема котельной установки:
а – в продольном сечении; б – общий вид геометрии котла с обозначением начальных границ

Следующим важным этапом является дробление исходной трёхмерной геометрической модели для создания сетки конечных элементов.

Моделирования аэродинамических и газовых процессов и течений (CFD-моделирование) в программном пакете Ansys Fluent реализовано методом конечных элементов.

Первоначально была принята адаптивная, преимущественно тетраэдральная сеточная модель. Но в дальнейшем, для уменьшения размера и количества элементов сетки сеточная модель была перестроена на полиэдрическую (многогранную) структуру. Это позволило несколько ускорить процесс решения, существенно снизив общее количество элементов с 1 391 201 до 486 979, без потери качественных показателей (рис. 2).

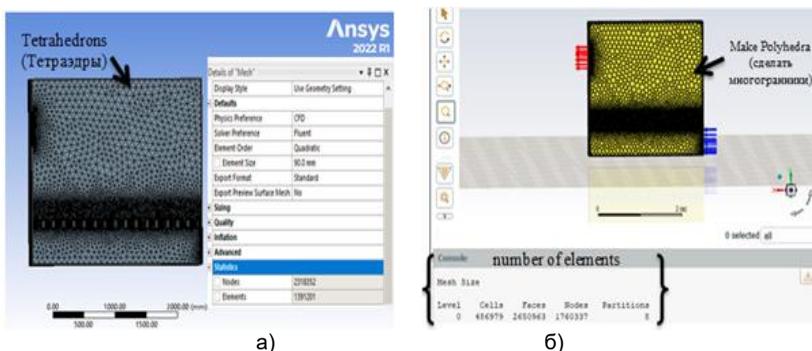


Рис. 2. Общий вид исследуемой геометрии с отображением сеточной модели:
 а – модель сетки тетраэдрической структуры;
 б – модель сетки полиэдрической структуры

В целом модель горения реализована совместным использованием модели переноса (смешения) компонентов Species Transport с механизмом расчёта реакций Eddy Dissipation. При этом состав твёрдого топлива задавался следующими компонентами: углерод С, кислород О, водород Н, азот N, сера S, содержание H₂O, летучие вещества, зола и стабильный углерод (рис. 3).

Для каждого компонента устанавливается определенное значение согласно теоретическим расчетам (табл. 1), а также количеству поступающего на горение воздуха (с массовым расходом 0,41 кг/с и температурой 273 К) и общей мощности установки пропорционально поступающего топлива (с массовым расходом 0,07 кг/с и температурой 273 К). На поверхности, соответствующей выходу продуктов сгорания из топki котельной установки приняты следующие граничные условия: статическое давление равно 0 Па, начальная температура 273 К.

Coal Streams
Number of Coal Streams: 1
Coal Stream ID: 1

Coal Properties

Proximate Analysis
 Volatile: 0.496
 Fixed Carbon: 0.135
 Ash: 0.269
 Moisture: 0.1

Ultimate Analysis (DAF)
 C: 0.547
 H: 0.073
 O: 0.366
 N: 0.014

Mechanism
 One-step Reaction
 Two-Step Reaction
 Include SO2

Options
 Wet Combustion

Settings
 Coal Particle Material Name: coal-particle
 Coal As-Received HCV [J/kg]: 1.5e+07
 Volatile Molecular Weight [kg/kmol]: 30
 CO/CO2 Split in Reaction 1 Products: 1
 High Temperature Volatile Yield: 1
 Fraction of N in Char (DAF): 0.7
 Coal Dry Density [kg/m³]: 1400

Gas Phase Reaction
 C1.05 H2.76 O0.87 N0.0381 + 0.78 O2 =>
 1.05 CO + 1.38 H2O + 0.0190 N2
 CO + 0.5 O2 => CO2

OK Apply Cancel Help

Рис. 3. Характеристики топлива

угарного газа по сечению котельной установки.

При этом максимальное значение концентраций составило: CO₂ = 0,186, CO = 0,0858, NO_x = 0,0004.

Таблица 1. Состав исследуемого топлива

Наименование	Состав топлива (ТКО), мас. %
Горючая элементарная масса	
Углерод C ^r	54,7
Кислород O ^r	36,6
Водород H ^r	7,3
Азот N ^r	1,4
Сера S ^r	0
Сумма	100
Составные части	
Зольность A ^p	26,9
Влажность W ^p	10
Связанный углерод	13,5
Летучие вещества	49,6
Сумма	100

Получена картина температурных полей на стенках корпуса котельной установки. Заметна значительная разница температуры стенки корпуса в области течения воздуха, поступающего на горение, по сравнению с температурой стенки в области основной части топки.

Модель (энергии), известная как уравнение переноса энергии, является первой моделью, которая активируется в начале фазы моделирования после инициализации расчёта теплового котла. Использовалась модель турбулентности k-ω (SST), которая позволяет с достаточной точностью решать задачи газодинамики при моделировании пристенных течений, кроме этого, данная модель хорошо предсказывает отрывные течения.

В результате моделирования получены значения максимальной температуры горения органического топлива, значение которого составило около 1978,7 К. Что соответствует теоретически расчётным значениям.

Определены поля концентраций (в массовых долях) углекислого и угарного газа по сечению котельной установки. При этом максимальное значение концентраций составило: CO₂ = 0,186, CO = 0,0858, NO_x = 0,0004.

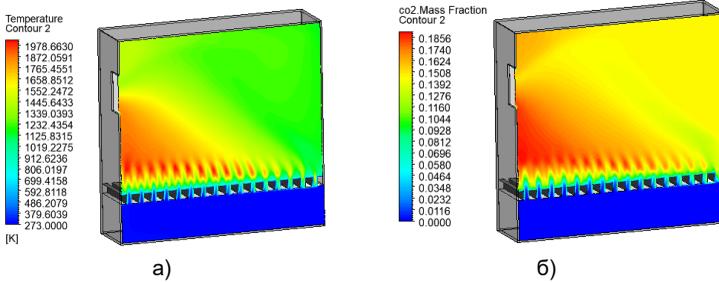


Рис. 4. Распределение расчётных параметров по продольному сечению котельной установки: а – распределение температуры, К; б – распределение концентраций CO_2 (массовые доли)

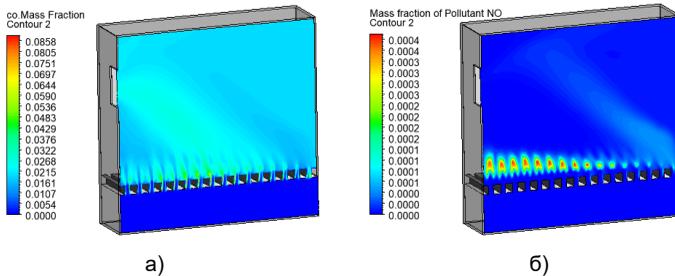


Рис. 5. Распределение расчётных параметров по продольному сечению котельной установки: а – распределение концентраций CO (массовые доли); б – распределение концентраций NO (массовые доли)

Получены линии токов в топочном пространстве – которые позволили определить расположение застойных зон, а также значение скорости на границе выхода дымовых газов из топки.

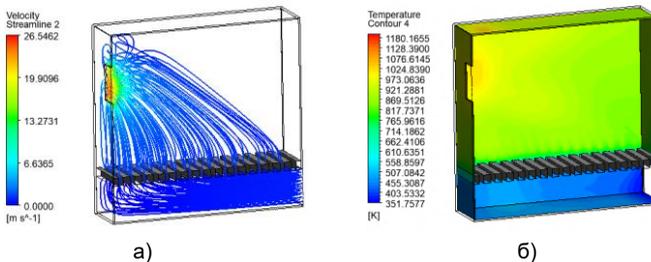


Рис. 6. Распределение расчётных параметров по результатам моделирования: а – траектории движения топливно-воздушной смеси, м/с; б – распределение температуры на поверхности котельной установки, К

Выводы.

Выявлено смещение области максимальных температур в топочном пространстве в сторону окна выхода дымовых газов. В области над колосниковой решёткой, у окна для входа воздуха, горение твёрдого топлива практически не происходит, что видно по картине распределения температур.

Таким образом в результате моделирования получены данные, необходимые для проектирования котельной установки, работающей на твёрдом топливе, а также определены условия для повышения эффективности.

Литература

1. Любов В.К., Владимиров А.М. Комплексная эффективность применения древесных гранул в энергоустановках // Известия вузов. Лесной журнал. – 2021. – № 1. – С. 159-172.

2. A novel comprehensive CFD-based model for municipal solid waste incinerators based on the porous medium approach / Q.N. Hoang, J.V. Caneghem, T. Croymans et al. // Fuel. – 2022. – Vol. 326. – P. 124963.

2. Yin C., Rosendahl L.A., Kær S.K. Grate-firing of biomass for heat and power production // Progress in Energy and Combustion Science. 2008. Vol.34. P. 725–754.

3. Слободчиков Е.Г. Исследование работы твердотопливных теплогенераторов малой мощности в климатических условиях Севера // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 10. – С. 49-58.

4. Numerical modeling of the co-firing process of an in situ steam-torrefied biomass with coal in a 230 MW industrial-scale boiler / S. Szufa, P. Piersa, R. Junga, A. Błaszczuk // Energy. – 2023. – Vol. 263. – P. 125918.

5. Mostafa M., He L., Wang Y., Xiang J. Investigating the effect of integrated CO₂ and H₂O on the reactivity and kinetics of biomass pellets oxy-steam combustion using new double parallel volumetric model (DVM) // Energy. 2019. Vol. 179. P. 343-357.

6. Сжигание RDF-топлива с использованием кислородного дутья / В.М. Коновалов, А.А. Гончаров, А.С. Федоров и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 79-86.

УДК 536.468

С.В. СЫРОДОЙ, д.т.н.,
Г.В. КУЗНЕЦОВ, д.ф.-м.н.

Томский политехнический университет, НОЦ И.Н. Бутакова
634050 г. Томск, проспект Ленина 30а
E-mail: ssyrodoy@yandex.ru

Влияние условий теплообмена на динамику воспламенения частиц древесно-угольного топлива

Аннотация. В работе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов зажигания и горения частиц древесно-угольного топлива в условиях высокотемпературного нагрева.

Ключевые слова: уголь, биомасса, зажигание, горение

S.V. SYRODOY, Doctor of Engineering,
G.V. IVANOV, Doctor of Physics

Tomsk polytechnic university, SEC I.N. Butakova
634050 Tomsk, Lenina avenue.
E-mail: ssyrodoy@yandex.ru

Influence of Heat Transfer Conditions on the Ignition Dynamics of Wood-Coal Fuel Particles

Annotation. The paper presents the results of experimental and theoretical studies of the processes of ignition and combustion of particles of charcoal fuel under conditions of high-temperature heating.

Key words: coal, biomass, ignition, combustion

Проблема глобального изменения климата [1], обусловленная антропогенным воздействием, является системообразующим фактором, существенно влияющим на тенденции развития энергетического сектора любого государства [2]. На этом фоне в общий баланс тепло- и электрогенерации все активнее внедряются возобновляемые источники энергии. К последним относятся технологии сжигания эколого и энергоэффективных топливных композиций на основе угля (топливные смеси уголь/биомасса). Как показано в [3], при добавлении в уголь древесины эффективность работы котельного агрегата повышается. Кроме того, широкомасштабное внедрение биомассы в энергетику существенно расширяет сырьевую базу электростанций. Однако, использование древесно-угольных композиционных топлив на ТЭС сопряжено с рядом технологических [4] и технических трудностей [5]. Одной из базовых проблем является отсутствие теоретических основ процессов зажигания и горения такого существенно неоднородного топлива.

Проведены экспериментальные исследования процессов совместного воспламенения и горения частиц сухого угля и древесины. В экспериментах использовался стенд, схема которого приведена на рис. 1. По методам регистрации основных характеристик и условий нагрева стенд аналогичен описанному в [6]. В экспериментах использовались два вида топлив: частицы длиннопламенного угля, и древесины (лиственницы). Методика подготовки топлива аналогична описанной в [7].

На рис. 2 приведены зависимости времен задержки зажигания частиц угля (рис. 2,а) и биомассы (рис. 2,б) от расстояния между частицами (d) при различных температурах внешней среды.

Анализ зависимостей показывает, что в условиях относительных низких температур значение d оказывает существенное влияние на время задержки зажигания (t_{ign}). Можно отметить, что при $T_g=873K$ зависимость $t_{ign}(d)$ параболическая. Другими словами, существует некоторое оптимальное (по условиям зажигания) расстояние между частицами топлива. Эта тенденция характерна как при зажигании

угольной, так и при воспламенении древесной частиц. С увеличением температуры внешней среды влияние расстояния между частицами на характеристики их зажигания существенно уменьшается.

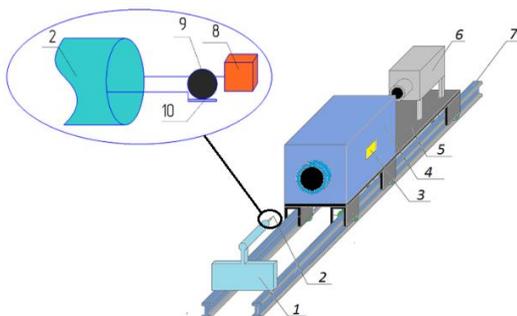


Рис. 1. Схема экспериментальной установки
 1 – подставка для держателя; 2 – металлический держатель;
 3 – табло управления; 4 – высокотемпературная печь;
 5 – передвижная платформа; 6 – высокоскоростная видеокамера;
 7 – рельсы; 8 – частица древесины; 9 – частица угля; 10 – держатель

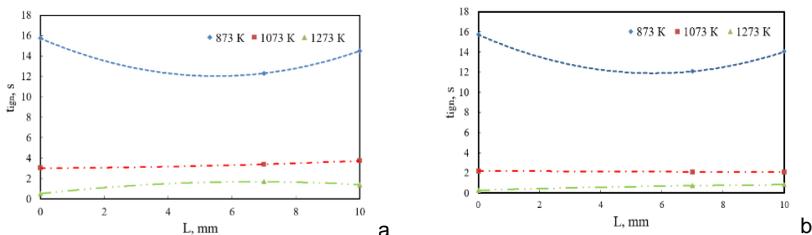


Рис. 2. Зависимости времён задержки зажигания частицы угля (а) и древесины (б) от среднего расстояния между ними при разных температурах окружающей среды

Вывод. По результатам экспериментальных исследований установлены времена задержки зажигания частиц угля и биомассы в условиях их совместного воспламенения в высокотемпературной среде. Показано, что топливные частицы оказывают существенное влияние на характеристики и условия воспламенения друг друга. Так в условиях относительно низких температур внешней среды ($T_g=873\text{K}$) добавление древесины к углю существенно ускоряет процесс зажигания последнего (в среднем на 20-30%) по сравнению с процессом воспламенения однородного угля. Это обуславливается тем, что древесная биомасса богата летучими по сравнению с углем. Но также установлено, что при $T_g=873\text{K}$ угольная частица существенно замедляет (в сред-

нем на 30%) процесс воспламенения древесины. Это скорее всего обусловлено тем, что у угля более высокая теплоемкость по сравнению древесиной. В результате газ, окружающий угольные частицы, быстро охлаждается и критические (по условиям воспламенения) значения температур и концентраций достигаются с некоторым запаздыванием.

Литература

1. Lin J. Has coal use peaked in China: Near-term trends in China's coal consumption. *Energy Policy* – 2018. – V. 123. – pp. 208-214.
2. Lin B. Energy, economic and environmental impact of government fines in China's carbon trading scheme. *Science of the Total Environment* – 2019. – V.667 – pp. 658–670
3. Rokni E. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels. *Fuel* – 2018. – V. 211 – pp.363-374
4. Sami M. Co-firing of coal and biomass fuel blends. *Prog. in Ener. and Combust. Sci.* -2001 – V. 27 – pp.171–214
5. Liu Q. Co-firing of coal and biomass in oxy-fuel fluidized bed for CO₂ capture: Are-view of recent advances. *Chines Journal of Chemistry Engineering.* - 2019 - V. 27 – pp. 2261–2272
6. Syrodoy S.V. The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal–water fuel particles ignition in high temperature environment, *Combust. and Flame* – 2017. – V. 180 – pp. 196–206
7. Kuznetsov G.V. Influence of a wet wood particle form on the characteristics of its ignition in the high-temperature medium. *Renew. Ener.* – 2020. –V.145 – pp.1474-1486

УДК 536.2

В.Ю. МИТЯКОВ, д.т.н., профессор
А.А. ГУСАКОВ, д.т.н., профессор,
М.С. БЕРНАНС, инженер

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29
E-mail: milana.bernans@gmail.com

Градиентная теплотметрия в исследовании теплообмена при плавлении снега

Аннотация. Представлено экспериментальное исследование теплообмена при плавлении снега с использованием градиентной теплотметрии. Описаны методика эксперимента и экспериментальный стенд. Получена зависимость местной плотности теплового потока от времени (временная теплотграмма) на теплообменной поверхности. Отличие осредненного по времени значения теплового потока, полученного экспериментально, не превышает 13 % от рассчитанного аналитически.

Ключевые слова: градиентные датчики теплового потока (ГДТП), градиентная теплотметрия, плавление снега, снеготопильная установка

V.Yu. MITYAKOV, Doctor of Engineering, professor,
A. A. GUSAKOV, Docent, Doctor of Engineering, professor,
M. S. BERNANS, engineer

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
195251, Russia, St.Petersburg, Politechnicheskaya, 29
E-mail: milana.bernans@gmail.com

Gradient heatmetry in study of heat transfer during snow-melting

Abstract. An experimental study of heat transfer during snow-melting using gradient heatmetry is presented. The experimental technique, experimental set up are described. The dependence of local heat flux per unit area on time (time-depended heat flux graphs) on the heat transfer surface is obtained. The difference in the time-averaged heat flux obtained experimentally does not exceed 13 % of calculated one.

Key words: gradient heat flux sensors (GHFS), gradient heatmetry, snow-melting, snow-melting systems

Утилизации снежных масс требует использовать снегоплавильные установки. Исследование теплообмена при плавлении снега позволяет оценить их эффективность. Обзор литературы показал, что изучению теплообмена при плавлении снега уделено мало внимания.

Проектирование снегоплавильных панелей основано на уравнении теплового баланса. Такой способ трудоемок и неточен, кроме того, сложно описать нестационарность процесса. Широкие возможности дает градиентная теплотметрия, которую успешно применяют в научно-образовательном центре «Теплофизика в энергетике» СПбПУ [1, 2].

Градиентная теплотметрия предусматривает использование градиентных датчиков теплового потока (ГДТП). Действие ГДТП основано на поперечном эффекте Зеебека [3]: при прохождении теплового потока через пластину с анизотропией тепло-и термоэлектрических свойств в ней возникает термоЭДС, пропорциональная модулю теплового потока

$$\vec{E}_1 = S_0 \cdot \vec{q} \cdot F, \text{ мВ,}$$

где S_0 – вольт-ваттная чувствительность ГДТП, мВ/Вт; \vec{q} – плотность теплового потока, Вт/м²; F – площадь ГДТП, м².

В опытах использовался ГДТП на основе монокристаллического висмута размерами $3 \times 3 \times 0,3$ мм с чувствительностью 1,55 мВ/Вт.

Общий вид и схема экспериментального стенда показаны на рис. 1.

Стенд включает бак с ТЭНами и циркуляционный насос. Модель снегоплавильной панели представляет набор из 16 алюминиевых трубок длиной 500 мм, уложенных с зазором 3 мм. Наружный диаметр трубок – 15 мм, толщина стенки – 1 мм, полная рабочая поверхность – 0,26 м². Стенд оснащен счетчиком воды и электронными термометрами для контроля температуры воды на входе в панель и выходе из нее.

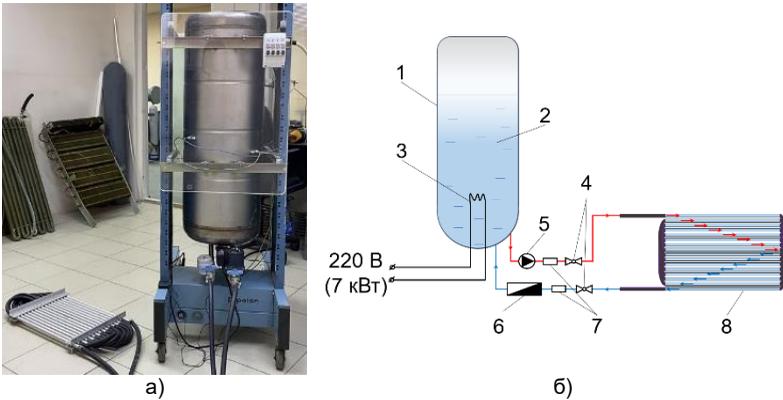


Рис. 1. Экспериментальный стенд:
 а – общий вид, б – схема: 1 – бак; 2 – вода; 3 – ТЭН; 4 – шаровые краны;
 5 – насос; 6 – счетчик воды; 7 – термометры; 8 – модель снегоплавильной панели

Местная плотность теплового потока на поверхности центральной трубки измерялась ГДТП, сигнал которого регистрировал ИВК National Instruments. На рис. 2 представлены фотографии модели и трубки с установленным на ней ГДТП.



Рис. 2. Модель снегоплавильной панели (а) с установленным ГДТП (б)

В ходе опыта при температуре окружающей среды $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ на модель снегоплавильной панели поместили 5,5 кг снега. В результате были получены временная термограмма (рис. 3, а) и временная теплограмма (рис. 3, б).

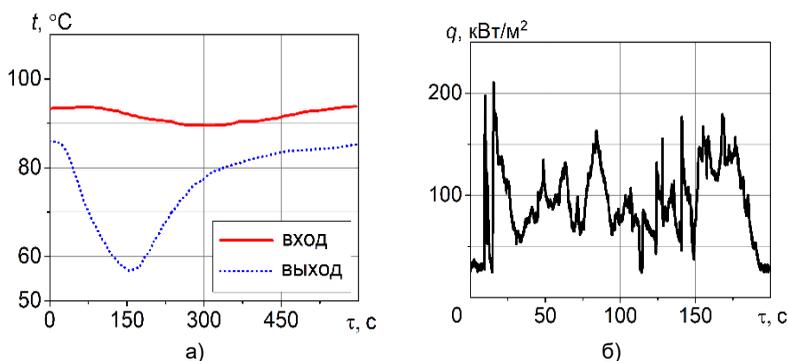


Рис. 3. Временная термограмма (а); временная теплограмма (б)

Видно, что измерение температуры воды не позволяет четко отследить границы фазового перехода, тогда как на теплограмме видны пульсации теплового потока, подтверждающие нестационарность процесса, и границы начала и окончания плавления снега; длительность процесса составила 187 с. Средняя по поверхности теплообмена плотность теплового потока, определенная с помощью ГДТП составила $90,6 \text{ кВт/м}^2$, значение, рассчитанное по уравнениям баланса, $78,7 \text{ кВт/м}^2$.

Результаты экспериментов показали информативность и адекватность подхода, а также перспективы предлагаемого метода. Размещение ГДТП в различных частях панели позволяет оценить распределение тепловой нагрузки по поверхности и оптимизировать ее конструкцию. Наглядная связь физической картины плавления снега с временными теплограммами – главная и определяющая ценность предлагаемого методического подхода.

Литература

1. Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В. [и др.] / Исследование кипения на поверхности шара методом градиентной теплотметрии // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13, № 10. С. 434-441.
2. Гусаков А. А., Греков М. А., Сероштанов В. В. / Аэродинамика и теплообмен на поверхности одиночного кольцевого ребра // Научно-технические ведомости СПбПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11, № 2. С. 151-164.
3. Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Y., Mityakov A. V. [et al.]. Gradient Heatmetry Advances. Energies 2020, 13, 6194.

УДК 681.518.2

Г.А. ФЕДОТОВ, аспирант
Н.А. СПИРИН, д.т.н., профессор

Уральский Федеральный Университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 28
E-mail: grigory.fedotov@urfu.ru

Оценка неравномерности распределения материала и газа по динамике температурного поля на колошнике доменной печи

Аннотация. Данная работа показывает оценку динамики прогрева слоя, образованного подачей шихтовых материалов, оцениваемой по изменению в цикле между подачами относительной температуры газа на выходе из слоя материалов.

Ключевые слова. Доменная печь, оценка неравномерности распределения материала, температурное поле.

G.A. FEDOTOV, Postgraduate student
N.A. SPIRIN, Doctor of technical sciences, Professor

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
620002, Yekaterinburg, Mira Street, 28
E-mail: grigory.fedotov@urfu.ru

Evaluation of the uneven distribution of material and gas according to the dynamics of the temperature field on the blast furnace grate

Abstract. This work shows an estimate of the dynamics of the heating of the layer formed by the supply of charge materials, estimated by the change in the cycle between the applications of the relative temperature of the gas at the outlet of the material layer.

Keywords. Blast furnace, evaluation of uneven distribution of material, temperature field.

Абсолютные значения температур газа над уровнем засыпи доменной печи не всегда отражают закономерности распределения потоков шихты и газов. Для контроля распределения материала и газов используются закономерности нестационарного теплообмена в верхней части доменной печи. Динамика прогрева слоя, образованного подачей шихтовых материалов, оценивается по изменению в цикле между подачами относительной температуры газа на выходе из слоя материалов.

$$\theta'' = \frac{T'' - t'}{T' - t'}$$

где t' – начальная температура загружаемых материалов; T' – температура газа, поступающего в теплообмен перед подачей очередной пор-

ции материалов; T'' – температура газа на выходе из слоя материалов (на уровне засыпи).

Таким образом, относительна температура θ'' за цикл между подачами изменяется от 0 до 1, а слой совершает один оборот шихты. Динамика θ'' зависит от отношения теплоемкости потоков шихты и газа m . Слой, характеризующийся большой величиной m , требует больших затрат тепла на прогрев материала газом, и, следовательно, при прочих равных условиях интенсивность прогрева будет замедленной, что приведет и к уменьшению темпа роста температуры газа на выходе из слоя подачи. Следовательно, увеличение количества руды по сравнению с количеством кокса или уменьшение расхода газа в одном из вертикальных сечений приведёт к увеличению инерционности теплообмена в слое, сформированном в данном вертикальном сечении.

Результаты расчётов изменения относительной температуры газа на выходе из слоя материалов за время между смежными подачами при различных значениях m представлены на рис.1. Сплошными линиями показаны результаты расчетов θ'' при изменении m за счет неравномерности распределения только материалов, а пунктирные линии за счет неравномерности только газораспределения. Как следует из данных расчета, закономерности изменения относительной температуры газа на выходе из слоя θ'' определяются, в основном, только значением m и практически не зависят от того, за счет чего изменяется это отношение. При этом наибольшее различие в темпе прогрева слоя материалов наблюдается в моменты времени, равные $(0,2 - 0,5) \tau_{ц}$. Данная область на рисунке заштрихована.

Таким образом, если измерять температуру газа на уровне засыпи в различных точках колошника от момента опускания материалов в доменную печь до начала следующей подачи материалов, т.е. зафиксировать температуру газа на уровне засыпи сразу после опускания материалов ($\tau = 0$; $T''' = t'_м$), непосредственно перед началом следующей подачи ($\tau = \tau_{ц}$; $T''' = T'$), определить температуру газа на уровне засыпи в момент времени, равный $0,2 - 0,5$ интервала между подачами ($\tau = (0,2 - 0,5)\tau_{ц}$ цикла; $T = T''_{0,2-0,5}$), а затем подсчитать относительную температуру газа в момент времени, равный $(0,2 - 0,5) \tau_{ц} (\theta''_{0,2-0,5} = \frac{T''_{0,2-0,5} - t'_м}{T' - t'_м})$, то, используя различие в темпе перегрева слоя материалов в различных участках колошника, можно определить значение m в каждой из точек измерения. Между отношением теплоемкости потоков шихты и относительной температурой газа на выходе из слоя материала m существует однозначная зависимость: с ростом m уменьшается θ'' , которая с относительной погрешностью не более 1,1% описывается следующим уравнением при $\tau = (0,28 - 0,32) \tau_{ц}$:

$$m = 3,26 - 15,96\theta''_{0,3} + 38,80\theta''_{0,3}^2 - 51,20\theta''_{0,3}^3 + 34,70\theta''_{0,3}^4 - 9,50\theta''_{0,3}^5.$$

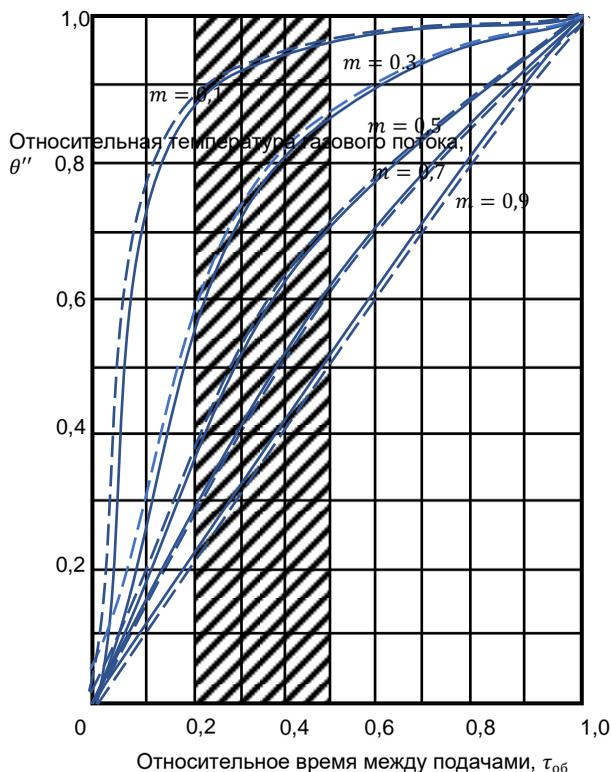


Рис. 1 Изменение температуры газового потока за цикл между подачами материалов при различных значениях отношения теплоёмкости потоков

Естественно, что для получения надежных и достоверных результатов целесообразно контролировать указанные параметры в течение нескольких циклов подач (10–15) и усреднять полученные результаты за цикл между смежными выпусками.

Литература

1. Теплофизические основы тепловой работы металлургических слоевых печей и агрегатов / Ярошенко Ю.Г., Швыдкий В.С., Спирин Н.А., Матюхин В.И., Лавров В.В.; под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: АМК «День РА», 2019. – 464 с. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41562915>

УДК 66.011

М.В. ТЕМЛЯНЦЕВ, д.т.н.,
А.В. ФЕОКТИСТОВ, д.т.н.,
В.В. ГОРДЕЕВ, магистрант

Сибирский государственный индустриальный университет
654007 г. Новокузнецк, ул. Кирова, зд. 42
E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

Российский государственный профессионально-педагогический университет
620143 г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11
E-mail: feoktis1@gmail.com

Санкт-Петербургский горный университет
199106, г. Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2
E-mail: gordey-1999@mail.ru

Обоснование влияния обогащения дутья кислородом на теплотехнологические параметры плавки материалов в низкошахтной печи

Аннотация. В работе представлены результаты математического моделирования процесса плавки материалов в низкошахтных печах (НШП), при обогащении дутья кислородом.

Ключевые слова: теплоэнергетика, интенсификация, обогащение дутья, НШП

M.V. TEMLYANTSEV, Doctor of Engineering,
A.V. FEOKTISTOV, Doctor of Engineering,
V.V. GORDEEV, Master's student

Siberian State Industrial University
654007 Novokuznetsk, Kirova str., zd. 42
E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

Russian State Vocational Pedagogical University
620143 Yekaterinburg, Mashinostroiteley str., 11
E-mail: feoktis1@gmail.com

Saint Petersburg Mining University
199106 St. Petersburg, line 21-ya V.O., house 2
E-mail: gordey-1999@mail.ru

Substantiation of the effect of oxygen enrichment of the blast on the heat-technological parameters of melting materials in a low-shaft furnace

Abstract. The paper presents the results of mathematical modeling of the process of melting materials in low-shaft furnaces (NSHP), when the blast is enriched with oxygen.

Key words: heat power engineering, intensification, blast enrichment, NSHP

Одной из ключевых стратегических задач современной теплоэнергетики является снижение потребления энергоресурсов на единицу производимой продукции и переход на более дешевые виды топлива. В настоящее время для плавки чугуна и силикатных материалов наибольшее

распространение (98 %) в промышленности получили твердотопливные низкошахтные печи, основным топливом для которых является кокс (литейный), который на сегодняшний день стал дорогостоящим сырьем. Актуальность сокращения использования литейного кокса в процессах плавки в современных условиях функционирования предприятий возрастает многократно, особенно в случаях необходимости повышения конкурентоспособности и перехода на импортозамещающие виды продукции для машиностроения, автомобилестроения, химической промышленности и стройиндустрии.

При применении различных топлив и интенсификации процессов плавки весьма важным является вопрос эффективности. При этом для ее оценки могут быть выбраны различные критерии, например, экономические, тепловые, экологические и др. Зачастую применение того или иного вида топлива, применения пылеугольных дисперсных материалов, подогрева дутья или его обогащения кислородом приводит к неоднозначному изменению значений критериев эффективности, например, топливо может быть дешевым, снижать себестоимость продукции, но обладать низкими теплотехническими характеристиками, снижать тепловую эффективность печи (приводить к снижению КПД, повышению удельного расхода топлива и т.п.).

Моделирование тепломассообменных и газодинамических процессов в печах с применением теории подобия широко используется в научных исследованиях на лабораторных установках, а его результаты применяются при создании новых конструкций промышленных агрегатов. Натурное моделирование позволяет в значительной степени снизить материальные и временные затраты при создании эффективных работающих конструкций печей, разработке рациональных температурных и тепловых режимов их работы.

Коллективом ученых под руководством И.Ф. Селянина [1] разработан и реализован на ПЭВМ комплексная детерминированная математическая модель процесса плавки чугуна в низкошахтной печи. Она включает в себя следующие блоки: динамику движения газов и материалов в шахте печи; кинетику газообразования в слое кокса топливной насадки; нагрев шихты до точки плавления; глубину зоны плавления и теплообмен при плавлении; теплообмен при нагреве жидкого металла; потери тепла через стенки шахты; физико-химические процессы образования шлака, окисления и восстановления элементов. Математическая модель верифицирована. Для проверки точности и адекватности численного моделирования использованы результаты экспериментов, проводимых на промышленных низкошахтных печах [1]. Анализ номограмм, используемых для управления процессом шахтной плавки, свидетельствует о необходимости продолжения работ по определению взаимосвязи между технологическими параметрами при разработке технологий ресурсосбережения, интенсификации. В частности, для печей с обогащенным кислородом дутья в число основных управляю-

щих параметров должен быть включен процент обогащения. Необходимо отметить, что применение методов физического моделирования при исследовании теплообменных и аэродинамических процессов в низкошахтных печах вызвано максимальным приближением условий моделирования к реальным условиям, возникающим при плавке материалов. Физическое моделирование позволяет учесть всю совокупность взаимосвязей различных процессов и явлений, протекающих при плавке материалов в низкошахтных печах, в том числе и тех, которые до настоящего времени не имеют точного аналитического решения или математического описания, а соответственно не могут быть учтены при построении детерминированных математических моделей.

Приведенная в работе [1] математическая модель является одной из наиболее полных и комплексных моделей плавки материалов в низкошахтных, однако она не позволяет исследовать влияние, обогащения дутья кислородом на тепловую работу низкошахтной печи. В связи с этим на ее основе была разработана новая усовершенствованная математическая модель, отличающаяся наличием дополнительных блоков, обеспечивающих учет этих технологических особенностей.

Для разработки детерминированной математической модели потребовалось уточнение ряда известных и получение новых расчетных соотношений для определения высоты кислородной зоны и температуры поверхности кусков топлива в слое топливной насадки. Результаты математического моделирования влияния обогащения дутья кислородом на различные параметры работы НШП и технологии шахтной плавки находят логичное теоретическое обоснование и позволяют получить новые закономерности и соотношения для осуществления теплотехнологических расчетов.

Настройку и верификацию математической модели проводили с использованием результатов промышленных экспериментов по плавке чугуна в низкошахтных печах с применением дутья, обогащенного кислородом [1]. На рисунке 1, в качестве примера, показаны результаты математического моделирования, а именно расчета с применением разработанной модели температуры чугуна в зависимости от содержания кислорода в дутье (сплошная линия), точками показаны экспериментальные данные. Погрешность расчета температуры чугуна не превышает ± 12 °С.

Установлено, что обогащение дутья кислородом способствует росту производительности печи, увеличению скорости схода шихты и, как следствие, ведет к уменьшению времени нагрева шихты до температуры плавления, одновременно растет высота зоны нагрева по отношению к начальной высоте, а высота топливной насадки уменьшается.

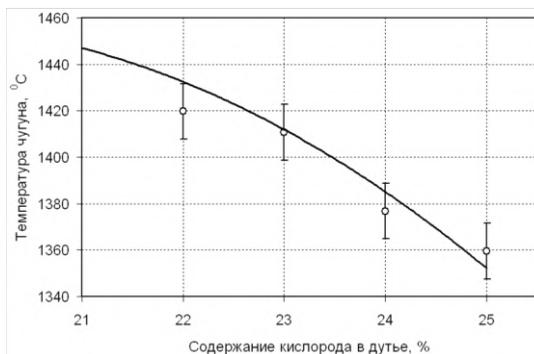


Рис. 1. Результаты определения температуры чугуна в зависимости от обогащения дутья кислородом: сплошная линия – математическое моделирование, точки – экспериментальные данные

Дополнительно детерминированная математическая модель процесса плавки материалов в низкошахтных печах, позволяет исследовать влияние подогрева и применения пылеугольного топлива на тепловую работу печи и производить численные расчеты номограмм процессов плавки. Для практического использования построены номограммы процесса плавки чугуна в низкошахтной печи [1] для условий (O_2 – обогащение дутья кислородом, %; T_q – температура дутья, К): $O_2 = 25\%$ и $T_q = 300\text{ К}$; $O_2 = 30\%$ и $T_q = 300\text{ К}$; $O_2 = 21\%$ и $T_q = 1000\text{ К}$.

Литература

1. Селянин, И.Ф. Теория и практика интенсификации технологического процесса в шахтных печах малого диаметра. В 3 т. Т. 1 / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев. – Москва : Теплотехник, 2010. – 379 с.

УДК 669.02.09

С.В. ЛУКИН, д.т.н.,
ПЕТРОВА Г.М., к.т.н.,
Д.В. ПОРОДОВСКИЙ, аспирант

Череповецкий государственный университет, Инженерно-технический институт,
162600 г. Череповец, ул. Дзержинского, 30
E-mail: s.v.luk@yandex.ru, d.porodovsky@yandex.ru

Математическое моделирование тепловой работы каупера при сжигании в нем конвертерного газа

Аннотация. Работа содержит установочные данные о химическом составе конвертерного газа, а также результаты теплоэнергетического расчета горения конвертерного газа в различные моменты времени в течение продувки конвертера.

Ключевые слова: конвертерный газ, химический состав, регенеративный теплообмен, коупер.

S.V. LUKIN, Doctor of Engineering,
G.M. PETROVA, Doctor of Engineering,
D.V. PORODOVSKIY, postgraduate student

Cherepovets State University, Engineering and Technical Institute,
162600 Cherepovets, st. Dzerzhinsky, 30
E-mail: s.v.luk@yandex.ru, d.porodovsky@yandex.ru

Mathematical modelling of cowper's thermal operation during combustion of converter gas

Abstract. The thesis contains the service data about chemical composition of the converter gas, as well as the results of the thermal calculation of the combustion of the converter gas at various points in time during the purge of the converter.

Key words: converter gas, chemical composition, regenerative heat exchange, cowper.

Чтобы полностью утилизировать конвертерный газ и не терять тысячи тонн условного топлива чаще всего предлагают схему, требующую применения дорогостоящего газгольдера, а также прокладки газопровода конверторного газа по территории комбината длиной в несколько километров. В настоящее время срок окупаемости такой схемы превышает 20 лет, и в ближайшем будущем она неприменима. Значительно более простой и дешевой представляется схема с аккумулярованием теплоты сгорания конверторного газа в регенераторе типа коупера, с последующей отдачей этой теплоты нагреваемому воздуху. [1]

Для её реализации необходимо иметь минимум два регенератора, один из которых работает в режиме разогрева дымовыми газами, получаемыми от сгорания конверторного газа, а другой – в режиме охлаждения воздухом, продуваемым противоточно через насадку.

При данном способе конвертерный газ сжигается в регенераторе, обеспечивая нагрев кирпичной насадки. В последующий цикл на нагрев переводится второй регенератор, а в первом нагревается воздух, идущий затем к потребителям теплоты. [2]

Рассмотрим пример моделирования работы регенератора с параметрами: высота насадки $H = 20$ м; площадь сечения насадки $S = 100$ м²; полное число каналов в насадке $N = 101860$; Расход конвертерного газа в течение всей продувки = 400 тыс. м³/ч; массовый расход воздуха в расчете на один канал: $G_{\text{в}} = 0,003$ кг/с; температура греющих газов на входе в насадку $t_{\text{г}0} = 1400$ °С; температура воздуха на входе в насадку $t_{\text{в}0} = 0$ °С; длительность нагрева и охлаждения - $\tau_{\text{н}} = \tau_{\text{о}} = 18$ мин; длительность переключения $\tau_{\text{п}} = 4,5$ мин. Расход греющих газов задавался по зависимости, показанной на рис. 1 [3].

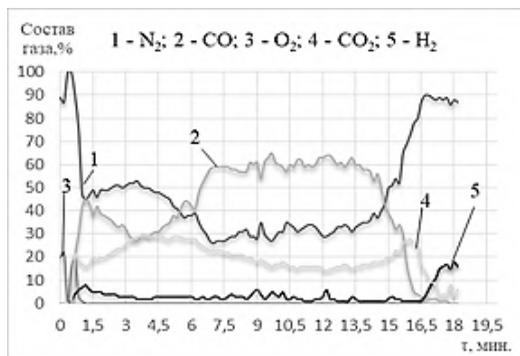


Рис. 1. Химический состав конвертерного газа во время продувки конвертера кислородом

В табл. 1 приведены результаты расчета для выбранных моментов времени (точек).

Таблица 1. Результаты расчета горения конвертерного газа в разные моменты времени.

Точки	τ , мин	CO, %	α	ν_r , $\text{нм}^3/\text{м}^3$	V_{0r} , тыс. $\text{нм}^3/\text{ч}$	G_r , кг/с
1	1,5	40	1,24	2,2	880	0,0033
2	3	23	1,0	1,94	826	0,0031
3	6	60	1,52	3,04	1216	0,0046
4	14	60	1,52	3,04	1216	0,0046
5	15	36	1,0	1,82	728	0,0027

Например, для точки 1 ($\tau = 1,5$ мин) содержание CO равно 40 %, содержание H_2 – 7 % (определено по рис. 1), коэффициент избытка воздуха – $\alpha = 1,235$, выход продуктов горения на 1 м^3 конвертерного газа – $\nu_r = 2,2 \text{ нм}^3/\text{м}^3$, полный расход греющих газов – $V_{0r} = 880$ тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$; массовый расход газов через один канал регенератора – $G_r = 0,0033$ кг/с. Для точки 2 ($\tau = 3$ мин), в которой CO = 23 %, H_2 – 2 %, при $\alpha = 1,0$ температура продуктов горения 1400 °С обеспечивается за счет обогащения конвертерного газа добавкой природного газа с расходом 25,3 тыс. м^3 (6 % от расхода топлива), при этом $\nu_r = 1,94 \text{ нм}^3/\text{м}^3$, $V_{0r} = 826$ тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$, $G_r = 0,00331$ кг/с.

Минимальный расход греющих газов через один канал $G_r = 0,0027$ кг/с соответствует точке 5 ($\tau = 15$ мин), в которой при $\alpha = 1,0$ обеспечивается необходимая температура горения без добавления природного газа (CO = 36 %, H_2 = 2 %).

Согласно данным, полученным в табл. 1, были построены кусочно-линейные зависимости расхода греющего газа через один канал насад-

ки от времени продувки конвертера. Полученные уравнения данных зависимостей показаны в табл. 2 [4].

Таблица 2. Расход греющего газа через один канал регенератора в режиме продувки конвертера

Промежуток времени	Расход греющего газа, кг/с
$\tau = 0 \dots 1,5$ мин	$G_r = 0$
$\tau = 1,5 \dots 3$ мин	$G_r = 0,0035 - 0,0003 \cdot \tau$
$\tau = 3 \dots 6$ мин	$G_r = 0,0016 + 0,0005 \cdot \tau$
$\tau = 6 \dots 14$ мин	$G_r = 0,0046$
$\tau = 14 \dots 15$ мин	$G_r = 0,0304 - 0,0018 \cdot \tau$
$\tau = 15 \dots 18$ мин	$G_r = 0$

На основании данных зависимостей расхода конвертерного газа от времени, полученных в таблице 2 можно вычислить КПД регенератора.

КПД регенератора определяется выражением:

$$\eta_p = Q/Q_0,$$

где Q – теплота газов, которая пошла на разогрев насадки регенератора, кДж;

Q_0 – теплота, которая поступила с греющими газами в насадку регенератора, кДж.

Величина Q_0 определяется по выражению:

$$Q_0 = \sum G_i h_{i0} \cdot dt,$$

где G_i – расход газов в i -й момент времени, кг/с; h_{i0} – энтальпия газов, кДж/кг, при температуре на входе в насадку t_0 ($t_0 = 1400$ °C); dt – шаг по времени, с.

В формуле суммирование (интегрирование) происходит по всем моментам времени периода разогрева насадки при переменном расходе греющего газа G .

Величина Q определяется по выражению:

$$Q_0 = \sum G_i (h_{i0} - h_i) dt,$$

где h_i – энтальпия газов при температуре на выходе из насадки t_i в i -й момент времени; dt – шаг по времени, с.

Энтальпии, кДж/кг, можно определить через температуру так:

$$h = a \cdot t + (b/2) \cdot t^2,$$

где a , b – коэффициенты в зависимости теплоемкости газа от температуры:

$$c = a + b \cdot t.$$

Для дымовых газов среднего состава: $a = 1,042$; $b = 0,00025$.

Вывод: в результате расчетов КПД регенератора получилось равным 87%. Данное значение КПД позволяет сказать, что взятые параметры каупера позволяют обеспечивать достаточно эффективный теплообмен и утилизировать теплоту сгорания конвертерного газа практически в полном объеме.

Литература

1. Лукин С.В. Схема утилизации конвертерного газа с применением тепловых аккумуляторов / Лукин С.В., Шахов В.В., Сухарев В.Ю. // Череповецкие научные чтения. – 2012. – №3. – С. 154-156.
2. Лукин С.В., Породовский Д.В., Разинков А.А., Бахвалов М.А. Математическая модель и алгоритм расчета теплового состояния регенератора для аккумуляирования теплоты сжигания конвертерного газа и нагрева воздуха для котла-утилизатора // Вестник Череповецкого государственного университета. 2021. № 3. С. 38-55.
3. Лукин С.В., Шестаков Н.И., Породовский Д.В., Разинков А.А. Моделирование тепловой работы регенеративного теплообменника для утилизации теплоты сжигания конвертерного газа // Metallurg. 2022. №7. С. 90-97.
4. Лукин С.В., Породовский Д.В. Сжигание конвертерного газа в регенеративном теплообменнике // Молодые исследователи – регионам: материалы Международной научной конференции в 3 т. – Вологда: ВоГУ, 2022. – Т. 1. – С.279-281.

УДК 662.9

В.И. МАТЮХИН, к.т.н.
А.В. МАТЮХИНА, к.т.н.
И.В. ПЛЕСАХИН

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
E-mail: matyhin53@mail.ru

Совершенствование факельного и тепломассообменных процессов во вращающихся печах для тепловой обработки дисперсных материалов

Аннотация. При работе вращающихся печей формирование высокотемпературного факела определяется условиями перемешивания газа и воздуха с возможностью расслоения их к концу печи и смещением его к верхней образующей печи. Повышение интенсивности теплообмена можно достигнуть использованием пульсации первичного воздуха и формированием поля акустических колебаний в рабочем пространстве.

Ключевые слова: вращающаяся печь, факел, пульсации воздушного дутья, энергия акустического поля

V.I. MATYUKHIN, Ph.D.
A.V. MATYUKHINA, Ph.D.
I.V. PLESACHIN

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
620002, Sverdlovsk Region, Yekaterinburg, st. Mira, 19
E-mail: matyhin53@mail.ru

Improvement of flare and heat and mass exchange processes in rotating furnaces for heat treatment of dispersed materials

Abstract. During operation of rotary furnaces formation of high-temperature flare is determined by conditions of gas and air mixing with possibility of their delamination to furnace end and its displacement to upper generatrix of furnace. Increase of heat exchange intensity can be achieved by using pulsation of primary air and formation of acoustic oscillation field in working space.

Key words: rotary furnace, torch, air blast pulsations, acoustic field energy

В промышленном производстве России используется огромное количество разнообразных по химическому и гранулометрическому составам рудных и нерудных компонентов. Для получения конечных коммерческих продуктов большинство из них подвергается тепловой обработке. Значительное разнообразие используемых таких технологических процессов предъявляют особые требования к их реализации при обеспечении заданных температурных и газодинамических условий при минимальных энергетических затратах и ограниченном воздействии на окружающую среду.

Наиболее распространенным тепловым агрегатом для первоначальной тепловой обработки кусковых рудных компонентов является вращающийся наклонный барабан благодаря слабой зависимости его технико-экономических показателей от свойств перерабатываемых материалов. В тоже время, реализация тепловых технологических процессов сопровождается высокими эксплуатационными затратами по обслуживанию этого агрегата, повышенными энергетическими затратами (до 300 кг усл.т/кг сырья) вследствие значительных тепловых потерь, ограниченности развития тепломассообменных явлений между высокотемпературными газами и нагреваемыми материалами, повышенным выносом пылевых компонентов газами (до 8-15г/м³). Все это наблюдается в условиях ограниченной управляемости процессов для достижения удовлетворительных конечных результатов при умеренном тепловом КПД агрегата не выше 40%.

Для сокращения отрицательных последствий работы вращающихся печей используется ряд эффективных технических средств и приемов. Так, для снижения объемов пылевых выбросов используется сложная многостадийная система газоочистки, а для утилизации тепла отходящих газов широко применяют теплоутилизирующие устройства (тепловые трубы, котлы - утилизаторы, экономайзеры, рекуператоры на отходящих газах). Значительные тепловые потери с готовым продуктом утилизируются в холодильниках различной конструкции с последующей регенерацией тепла с воздухом, поступающим на горение. Использование таких устройств отличается значительными капитальными и экономическими затратами с возможностью повышения теплового КПД печи до 55-60%. Все эти технические мероприятия касаются только изменения исходных и конечных показателей работы вращающихся печей при ограниченной управляемости непосредственно технологического процесса.

Процесс тепловой обработки дисперсных материалов во вращающихся барабанных печах осуществляется в режиме движения пересыпающегося слоя в условиях ограниченности тепломассообменных процессов на границе раздела материалов и факельного движения газов.

При ограниченности окислительных процессов в структуре нагреваемых материалов и сложности использования внутреннего источника тепла (обжиг минеральных компонентов) основным источником теплоты в рабочем пространстве барабанной печи является факельное сжигание газообразного или жидкого топлива, эффективное использование которого в существенной степени зависит от конструкции топливосжигающего устройства. Если факельное сжигание исходного топлива осуществляется в условиях организации диффузионного горения даже при использовании сложных конструкций топливораспределительных устройств, то, в силу физических свойств топлива и воздуха при организации факельного режима горения будет происходить по длине печи постепенное расслоение этих потоков по вертикали. Более легкие горючие компоненты смещаются к верхней образующей рабочего пространства вращающейся печи с постепенным растягиванием факельного процесса по вертикали и удалением области максимальных температур от поверхности материалов. Если учесть, что передача теплоты от факела к нагреваемым материалам осуществляется на 60-80% излучением, то развитие факельных процессов по длине печи в этих условиях сокращает интенсивность теплопередачи материалам и обеспечивают преимущественно нагрев корпуса печи с понижением производительности агрегата. При этом увеличиваются тепловые потери с отходящими газами и снижается эффективность использования топлива.

Применение более сложных конструкций горелочных устройств во вращающихся печах с использованием первичного воздуха с повышенными кинетическими параметрами (компрессорный или вентиляторный воздух) и вторичного, подаваемого с меньшей скоростью (2-3м/с), но с повышенной температурой (до 500-600°C), сокращает возможность расслоения газов при их движении с концентрацией тепла в области факела. Особенно это заметно в конструкциях с подачей первичного воздуха через внешнее кольцевое сопло. При этом более плотный поток воздуха ограничивает вертикальное перемещение потока топлива, способствует созданию более длинного и жесткого факела. При струйной подаче топлива и воздуха развитие тепломассообменных процессов в факеле сдерживается при их параллельном движении из-за ограниченности контакта и времени взаимодействия. Для улучшения перемешивания топлива и воздуха на внешней поверхности факела целесообразно использовать дополнительную турбулизацию воздушно-го потока первичного воздуха.

Наиболее раннее создание таких условий движения потока первичного воздуха при его турбулизации может происходить только в условиях изменения его скорости, а масштаб турбулентности определяется

ускорением движения газовых компонентов. Поэтому при создании общего высокотемпературного факела целесообразно использование воздушного потока с неустойчивым течением, т. е. с постоянно изменяющейся скоростью. Наиболее простым и одновременно эффективным способом добиться этого эффекта является использование периодического прерывания воздушного потока, т.е. создание его пульсаций с требуемой частотой.

Передача механической энергии колебаний между газовыми потоками, движущимися параллельными траекториями, может быть реализована в основном через пульсирующие колебания управляемого потока первичного воздуха с применением отдельного мембранного, поршневого или шибберного регулирующего расход устройства, устанавливаемого в начале траектории его движения.

В неустойчивой газодинамической системе факела формирования топливовоздушной смеси с помощью горелочного устройства процесс горения распыленного топлива ограничен внешней поверхностью создания пределов воспламенения. В условиях ограниченного распространения потока топлива в рабочем пространстве печи при расслоении газовых потоков эта задача ограничена кинетическими параметрами движения первичного воздуха. Поэтому использование пульсирующего воздушного потока с требуемой частотой позволяет создать наиболее рациональные условия горения газозвушной смеси на границе факела.

Одновременно с усилением окислительных процессов в объеме движущейся топливовоздушной смеси использование пульсирующего воздушного потока способствует интенсификации процесса зарождения локальных турбулентных полостей на границе контактирования газовых потоков с возникновением между ними сил взаимодействия Бьеркнеса и поршневого эффекта, сопровождающихся их взаимным проникновением. Это способствует перемешиванию масс газовых потоков при формировании внешних границ факела. Однако сложность и многофакторность развития этого процесса определяют возможность установления оптимальной частоты пульсаций только опытным путем. Возникновение при этом касательных напряжений между газовыми объемами, воздействие которых приводит к ускорению вращательного движения отдельных газовых объемов сопровождается ускорением процессов массообмена между ними с увеличением кратности циркуляции массовых потоков на величину до 40 %.

Использование пульсирующего воздушного потока при формировании топливовоздушной смеси с использованием горелочных устройств усиливает процессы перемешивания газовых потоков на границе их контактирования, создавая в движущемся потоке газов локальные зоны с пониженным давлением и ограничивают их расслоение. Это способствует распространению газовых потоков в рабочем пространстве печи за счет турбулентной диффузии в объеме факела и ускоряет процессы

взаимодействия потока распыленного топлива и воздуха при стабилизации температуры факела. Основная же масса газовой струи продолжает двигаться в направлении формирования нагревающего факела вблизи поверхности нагреваемых материалов.

Для реализации пульсирующего воздушного потока требуется использование механического прерывателя с возможностью формирования пульсирующего потока воздуха с частотой пульсации до 200Гц. Такая частота прерывания отличается непрерывностью подачи воздушного потока, что слабо влияет на устойчивость процесса горения топлива в факеле.

Производительность и эффективность реализации большинства слоевых высокотемпературных процессов определяются условиями развития движущихся сил массообмена и массопереноса, зависит от условий формирования их скоростных потоков в рабочем пространстве. Степень совершенства организации, как в отдельных фазах, так и на межфазных границах ограничена градиентом их изменения. Традиционные технические средства интенсификации таких процессов основываются преимущественно на изменении основных технологических параметров в пределах формирования физико-химических и термодинамических возможностей реализации (расход топлива, концентрация твердых и газовых компонентов, поверхностей реагирования, температурных условий и т.д.). Однако степень их воздействия ограничена пределами безопасных и экстремальных условий реализации основных стадий технологического передела преимущественно на границе раздела отдельных фаз. При этом получение их высоких технико-экономических показателей достигают в основном изменением конструктивных и технологических параметров реализации. Газодинамические же условия получения конечного продукта, состояние которых определяет кинетические особенности развития физико-химических процессов при реализации технологических условий, характеризуются присутствием существенной неравномерности распределения газовых потоков в объеме рабочего пространства вращающихся печей и на границе раздела фаз (диффузионные затруднения), сокращение которых возможно на основе применения энергоимпульсных технологий.

Наиболее простым и одновременно эффективным способом добиться этого эффекта является периодическое силовое воздействие с использованием механических устройств. Передача энергии колебаний между потоком газа или жидкости с твердой поверхностью может быть реализована в основном через формирование полей акустических или пульсирующих колебаний движущейся среды в рабочем пространстве технологического агрегата с применением источников требуемой энергетической мощности или отдельных мембранных, поршневых, шибберных регулирующих расход устройств, устанавливаемых в начале траектории движения потока.

Не зависимо от механизма внешнего механического воздействия на каждый элемент объекта воздействия плотностью ρ , находящийся в поле внешних колебаний амплитудой A и угловой частотой ω в газовой среде со скоростью звука c , перемещающуюся в направлении x , действует суммарное давление:

$$P = A \cdot \rho \cdot c \cdot \omega = \frac{\rho \cdot c \cdot \omega}{\omega} \sqrt{\frac{2J}{\rho \cdot c} \cdot 10^7} = \sqrt{2J\rho c}, \text{ атм} \quad (2.1)$$

величину которого можно изменять через конструктивные и технологические параметры процесса, воздействуя на величину входных возмущений.

В большинстве случаев получаемый эффект взаимодействия связывают с рассеиванием внешнего импульсно-энергетического воздействия в результате отражения, распределения, дифракции, интерференции, поглощения этого потока, а конечный результат зависит от физических свойств среды распространения колебаний.

Независимо от степени разобшенности элементов объекта воздействия каждый из них подвергаются действию динамического и статического напоров движущихся потоков (рис. 1).

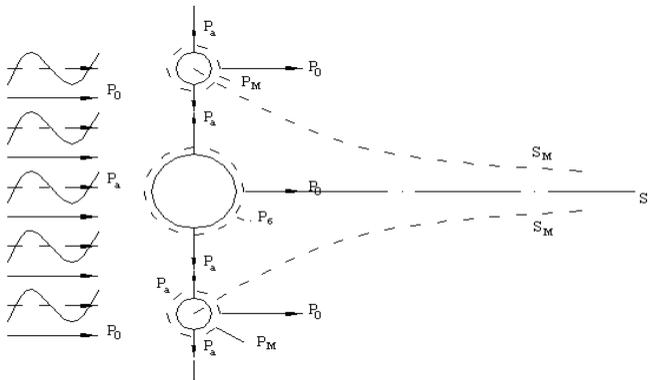


Рис. 1. Схема акустического воздействия на твердые элементы системы тел:

P_0 – статическое давление газового потока; P_a – акустическое давление; P_M – разрежение около малых элементов; P_6 – разрежение около больших элементов; S_M – траектория движения малых элементов; S_6 – траектория больших элементов

В поперечном направлении каждый твердый элемент системы тел испытывает действие Релеевой силы. При этом падающая на частицы акустическая волна угловой частотой ω и амплитудой A , омывая их с внешней стороны, формирует поле давлений излучения, действующее в обратном направлении. Образующаяся за частицами акустическая волна в виде турбулентных колебаний давления газовой фазы являет-

ся излучающей и может быть причиной озвучивания последующих элементов. Избыточное давление газа между твердыми элементами, вызванное внешними колебаниями поверхностей, компенсируется оттоком избыточного или недостающего количества движущейся среды через поры в основном в направлении распространения колебаний. При этом происходит возникновение дополнительного движения газовой среды, вызванного внешними колебаниями, с разрушением пограничного гидродинамического слоя и обеспечивающее интенсификацию теплообменными процессами на поверхности отдельных частиц.

В системе внешнего колебательного воздействия с высокой порозностью (запыленные газовые потоки), возникают контуры колебаний групп частиц, которые способствуют проявлению поршневого эффекта. При совпадении частоты внешних колебаний с частотой собственных колебаний твердых элементов возникает явление резонанса и амплитуда колебаний частиц постепенно увеличивается.

При полидисперсной структуре потока газопылевой суспензии различной плотности колебания его частиц вызывают формирование вокруг отдельных ее элементов локальных зон с отличным от внешней окружающей среды давлением. Чем больше размер обрабатываемых кусков, тем эта разница значительней. Поэтому в плотном слое под действие внешних акустических колебаний мелкие частицы перемещаются ближе к крупным, вокруг которых образуется локальная зона повышенного разрежения, формируя вокруг них зону с увеличенной концентрацией пылевых элементов. Этот факт является основой для дополнительного осаждения пылевых элементов непосредственно в обрабатываемом слое. Наиболее ощутимо этот эффект проявляется в условиях тех технологических процессов, где имеют место малые значения скоростей движения газов, а газовый поток отличается повышенным содержанием пыли. К таким объектам следует отнести слой кусковых материалов обрабатываемых в пересыпной слое вращающихся печей. При длительном воздействии периодических колебаний это обеспечивает возможность удержания пылевидных фракций вокруг крупных частиц, сокращая пылевынос на величину до 20-25%. При этом обязательно необходимо учитывать фактор времени действия акустического поля. Осажденные в слое пылевые частицы переходят в состав продуктов тепловой обработки.

Под действием внешних периодических колебаний слой кусковых материалов становится дополнительным источником звука. Поверхность его отдельных кусков начинает вибрировать с увеличенной амплитудой без нарушения контактов между ними. Наступает явление «озвучивания» слоя. Этот эффект обеспечивает разрушение вдоль твердой поверхности пограничного слоя, способствуя интенсификации теплообменными процессами, а при определенных условиях это приводит к разрушению существующих или образующихся настелей в виде конгломерата дисперсных частиц шихты.

При реализации энергоимпульсного воздействия на слоевые процессы с повышенной эффективностью необходимо придерживаться следующих принципов:

1. Наиболее полное и непрерывное воздействие внешних колебаний на запыленную среду. Для этого, в соответствие с конструктивными особенностями агрегата, определяют места установки источников акустического воздействия с возможностью максимального воздействия на запыленный поток.

2. Возможность реализации временного фактора акустического воздействия на запыленный поток.

3. Формирование акустического поля заданных параметров, установленных в соответствие с конструктивными особенностями агрегата и физико-химическими характеристиками пылевых частиц. Для этого устанавливают расчетным и экспериментальным путем оптимальные конструктивные и технологические параметры акустических газоструйных излучателей, обеспечивающих максимальное развитие требуемого технического эффекта (снижение пылевыноса, интенсификация тепломассообменных процессов, разрушение пылевых наростов и настывлей и т.д.).

4. Промышленные испытания использование энергии акустического поля с оценкой эффективности пылеосаждения и развития тепломассообменных процессов.

Промышленные испытания использования энергии акустического поля для интенсификации тепломассообменных процессов на ряде технологических агрегатов (вельц-печь, сушильная установка для сушки угля и железорудного концентрата, спекания бокситов и процесса кальцинации глинозема) показали широкие возможности применения этого способа.

Для реализации процесса использования энергии акустического поля в условиях вращающихся печей для обжига известняка предлагается установить два излучателя с наружной поверхности торцевой части холодной головки (4). При помощи металлических волноводов (9) в виде трубы диаметром 134мм, устанавливаемой с торца холодной головки печи через ее футеровку (рис.2) формируется в рабочем пространстве вращающейся печи акустическое поле заданных параметров.

При этом оси волноводов должны быть сфокусированы по центру обрабатываемого слоя (2) в районе горячей головки (1). С наружной стороны волноводов при помощи механического соединения устанавливаются два акустических излучателя (5). Конструкция соединения позволяет относительно просто удалять из печи акустические излучатели с целью их осмотра и ремонта. Поскольку они устанавливаются с наружной стороны, то особых требований к их изготовлению не требуется. Питание акустических излучателей осуществляется компрессорным воздухом с давлением не более 5 атм. расходом до 50м³/ч на излучатель. Контроль его осуществляется манометром (10), а регулирование производится при помощи крана (11).

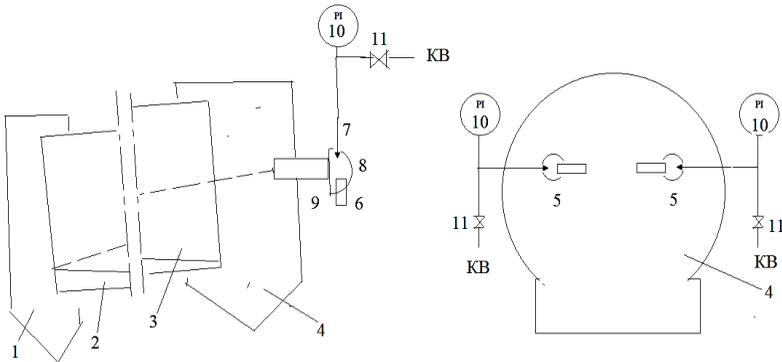


Рис.2. Схема установки акустических излучателей на вращающейся печи:
 1 – горячая головка; 2 – нагреваемый слой; 3 – барабан печи; 4 – холодная головка; 5 – акустический излучатель; 6 – резонатор; 7 сопло; 8 – концентратор; 9 – волновод; 10 – манометр; 11 – регулирующий кран; КВ – компрессорный воздух

При использовании энергии акустического поля в рабочем пространстве вращающейся печи обжига известняка ожидается получения следующих эффектов:

1. Снижение пылевыноса из рабочего пространства на величину до 20-25%, который переходит в готовый продукт с повышением производительности агрегата на 5-6%

2. Интенсификация тепломассообменных процессов приобжига известняка с сохранением максимальной возможной степени обжига будет способствовать увеличению производительности обжигового агрегата как минимум на 10-15%, снижает температуру отходящих газов на 100-150°C, увеличивает глубину всех химических преобразований в рабочем пространстве печи, что позволяет сократить общий расход топлива на 10-15%.

3. При резонансе внешних колебаний с собственной частотой обжигаемых материалов появляется возможность разрушения образующихся конгломератов шихты и настелей на внутренней поверхности вращающейся печи.

Простота конструкции и способа управления этим процессом открывает широкие возможности совершенствования показателей слоевых установок.

УДК 536.24

Д.А. КОНОВАЛОВ^{1,2}, д.т.н., профессор
Н.Н. КОЖУХОВ², к.т.н. доцент
И.И. МЕДВЕДЕВ², аспирант

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»

111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 17

² Воронежский государственный технический университет,

394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

E-mail: dmikonovalov@yandex.ru

Численное моделирование фазовых переходов в каналах энергоустановок, заполненных пористой средой

Аннотация. В работе проведено численное моделирование фазового перехода (испарение) в канале, заполненного пористой средой. Задача решена в нестационарной постановке. Проведена оценка времени выхода на стационарный режим.

Ключевые слова: интенсификация теплообмена, пористая среда, фазовый переход

^{1,2} D.A. KONOVALOV, Doctor of Engineering, professor

² N.N. KOZHUKHOV, PhD, associate professor

² I.I. MEDVEDEV, graduate student

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

Department of Theoretical Foundations

of Thermal Engineering named after M.P. Vukalovich

111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str. 17

² Voronezh State Technical University,

Department of Theoretical and Industrial Heat Power Engineering

394006, Voronezh, ul. 20-letiya Oktyabrya, 84

E-mail: dmikonovalov@yandex.ru

Numerical simulation of phase transitions in channels of power plants filled with a porous medium

Abstract. Numerical simulation of the phase transition (evaporation) in a channel filled with a porous medium is carried out. The problem is solved in a non-stationary formulation. The assessment of the time of entering the stationary mode was carried out.

Key words: intensification of heat transfer, porous medium, phase transition

Современное развитие техники и технологий связано с разработкой компактных энергетических установок различного предметного назначения с интенсивным тепловыделением. Задача отвода критических тепловых потоков успешно решается применением теплообменников с развитыми поверхностями, в т.ч. пористыми и микроканальными [1]. Анализ исследований за последние несколько лет показал, что механизмы интенсификации теплообмена в условиях однофазного течения

охладителя практически исчерпаны и предпочтение отдается фазовым переходам и методам их интенсификации.

Исследованию интенсификации теплообмена при фазовых переходах посвящены работы Д.А. Лабунцова, А.В. Дедова, Ю.А. Кузма-Кичты, А. Faghri и многих других [2-5].

В настоящей работе численно решена задача теплообмена при вынужденном течении теплоносителя в канале, заполненном пористой средой, в условиях испарения теплоносителя. Модель представляет из себя элемент прямоугольной формы (рис. 1), заполненный пористой алюминиевой средой с водой, который в свою очередь находится в пустом канале. К пористому элементу подводится тепловая энергия, например, путем воздействия теплового потока снизу. Сверху в пустой канал поступает сухой воздух и обдувает пористый элемент и охлаждает его за счет испарения.

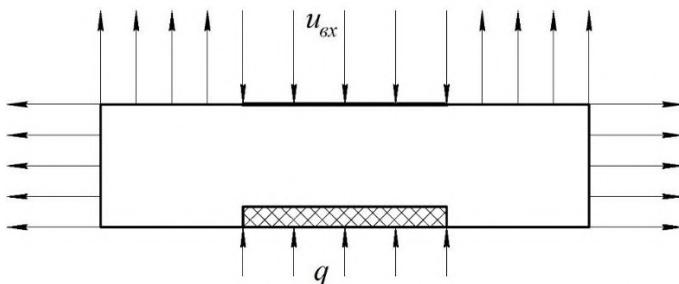


Рис. 1. Расчетная область

При построении модели были приняты следующие допущения:

- течение воздуха является стабилизированным и ламинарным;
- интенсивность испарения низкая;
- свойства пористой среды, зависящие от степени увлажненности не изменяются;
- интенсивность испарения прямо пропорциональна разности равновесной и неравновесной концентраций водяного пара;
- поток рассматривался неизотермичным.

В ходе моделирования использовался программный комплекс Comsol. Задача решалась в два этапа. На первом этапе в стационарной постановке определялась скорость потока. На втором этапе в нестационарной постановке были определены такие параметры как относительная влажность в пористом элементе и в окружающей его области; температура; содержание влаги в пористом элементе. Кроме того, получены графики зависимостей интегральной характеристики содержания влажности в пористом элементе от времени.

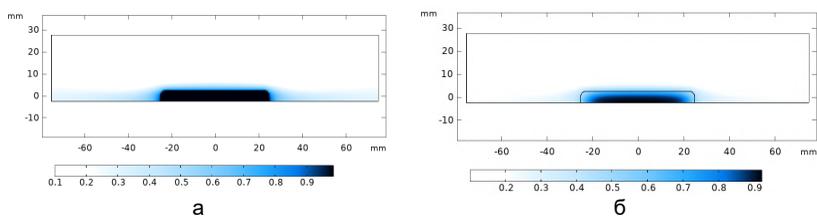


Рис. 2. Относительная влажность в пористом элементе:
а – через 20 с; б – через 15000 с

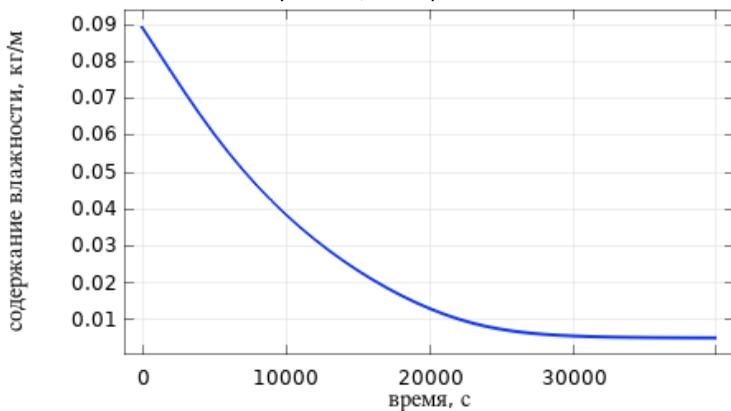


Рис. 3. Изменение содержания влаги в пористом элементе от времени

Вывод: Из представленных результатов видно, что за счет испарения влаги из пористого элемента снижается его температура на поверхности и достигает своего минимального значения через время, равное около 8 ч.

Литература

1. Saman R., Mohammad H. K., Kyung C. K., Omid S.A. Potentials of porous materials for energy management in heat exchangers –A comprehensive review // Applied Energy. – 2019. – V. 243. – pp. 206–232.
2. Лабунцов Д.А. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. – М. Издательство МЭИ, 2000. 388 с.
3. Дедов А.В. Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // Теплоэнергетика. №12. 2019 с. 18 – 54.
4. Kuzma-Kichta, Yu.A., Lavrikov, A.V., Shustov, M., Kustova, E.A., Ivanov, N.S., Kuleshov, E.A., Kiselev, A.S. Heat transfer crisis investigation in a microchannel with and without nanoparticles coating // (2020) Journal of Physics: Conference Series, 1683 (2), статья № 022087.
5. Transport Phenomena in Multiphase Systems / Amir Faghri, Yuwen Zhang. – San Diego.: Academic Press, 2006. 1030 p.

УДК 697.9: 621.311.22

В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор
И.И. СВЕТУШКОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г.Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: bao6095@mail.ru, ilia.svet@gmail.com

Анализ микроклимата на ивановской ТЭЦ-2

Аннотация. Выполнен анализ микроклимата главного корпуса Ивановской ТЭЦ-2 совместно с сотрудниками лаборатории химического цеха. Измерение параметров микроклимата в рабочих зонах станции проводилось на основных рабочих отметках в теплый и холодный периоды года. Анализ качества микроклимата за последние три года выявил отклонения ряда параметров от нормативных значений.

Ключевые слова: микроклимат, главный корпус ТЭЦ, параметры микроклимата, температура, относительная влажность

V.V. BUKHMIROV, Doctor of Engineering, professor
I.I. SVETUSHKOV, PhD student

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: bao6095@mail.ru, ilia.svet@gmail.com

Analysis of the microclimate at the ivanovo CHPP-2

Abstract. The microclimate of the main building of the Ivanovo CHPP-2 was analyzed together with the staff of the laboratory of the chemical shop. The measurement of the microclimate parameters in the working areas of the station was carried out at the main working marks in the warm and cold periods of the year. The analysis of the microclimate quality over the past three years revealed deviations of a number of parameters from the standard values.

Key words: microclimate, the main building of the CHP, microclimate parameters, temperature, relative humidity

Микроклимат в рабочих зонах производственного помещения определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности, скорости движения воздуха, теплового излучения и качества воздушной среды, которое определяется концентрацией твердых и жидких взвесей и ядовитых газов в воздухе [1]. Отклонение параметров микроклимата может привести к увеличению энергетических затрат на собственные нужды станции и ухудшению состояния здоровья персонала. Оптимизация микроклимата позволит сократить расходы энергии на собственные нужды и улучшить условия труда персонала станции. Согласно нормативному документу [1] на рабочих местах допустимая температура устанавливается в диапазоне 21-23°C, а в

зоне обслуживания оборудования 19-21 °С. Влажность же в обоих случаях допускается в диапазоне 40-60 %.

В главном корпусе Ивановской ТЭЦ-2 в котельном отделении установлено 8 котлоагрегатов и 5 паровых турбин. Между котельным и турбинным отделениями установлена разделительная стена. В главном корпусе имеется двое ворот, оборудованных воздушно-тепловой завесой и два дверных проема. На ТЭЦ-2 используется паровое отопление котлотурбинного цеха.

Экспериментальное исследование микроклимата проводилось на протяжении трех лет с периодичностью два раза в год – в летний и зимний период, согласно программе испытаний [2]. В процессе эксперимента было выполнено измерение температуры и относительной влажности воздуха в котельном отделении, турбинном отделении и на рабочих местах согласно требованиям, изложенным в правилах [2]. Измерения производились метеометром МЭС – 200А. Предел абсолютной погрешности при измерении температуры составляет $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур от -10°C до 50°C . Предел абсолютной погрешности измерительного прибора при измерении относительной влажности составляет $\pm 3\%$.

Измерения температуры и влажности в турбинном отделении выполнены на отметках 0,00 м, 8,00 м и 16,00 м по высоте цеха в 10 точках. На отметке 0,00 м три точки – у стены, в центре отделения и в угловой точке. На отметке 8,00 м четыре точки – в районе турбогенераторов №1, №2, №3, №4. На отм. 16,00 м три точки – в районе деаэратора бата №1, деаэратора подпитки котлов №2, деаэратора 6 ата №5. В котельном отделении были выбраны уровни на отметках 0,00 м, 8,00 м, 25,60 м с шестнадцатью точками измерений. На отметке 0,00 м четыре точки – в районе котлоагрегатов №1, №4 и № 8, а также в проходе котельного отделения. На отметке 8,00 м четыре точки – на щитах управления котлов 1-2, 3-4, 5-6, 7-8. На отметке 25,6 восемь точек – на площадках барабанов каждого котла. В качестве рабочих мест для контроля параметров микроклимата были выбраны кабинет начальника смены, кабинет старшего машиниста, рабочие места машинистов котлов и турбин.

На рис. 1 и 2 показано среднее на отметке значение температуры в турбинном и котельном отделениях станции в зависимости от температуры наружного воздуха. Анализ рисунков показывает, что практически на всех отметках по высоте (в местах измерения) и в зимний, и в летний периоды года наблюдается отклонение температуры от оптимальных значений.

На рис. 3 и 4 показано среднее на отметках значение относительной влажности в зависимости от температуры окружающей среды. Анализ графиков на этих рисунках позволяет сделать вывод о том, что на отметках 8,00 м и 25,6 м. в зимний и летний период наблюдаются отклонения относительной влажности.

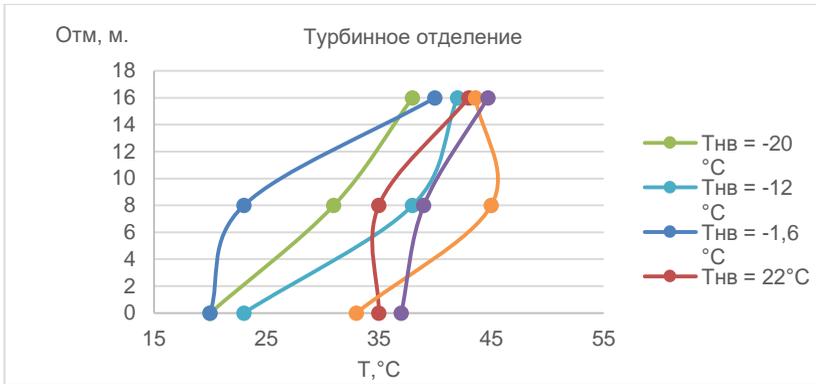


Рис.1. Распределение температуры по высоте турбинного отделения в зависимости от температуры окружающей среды

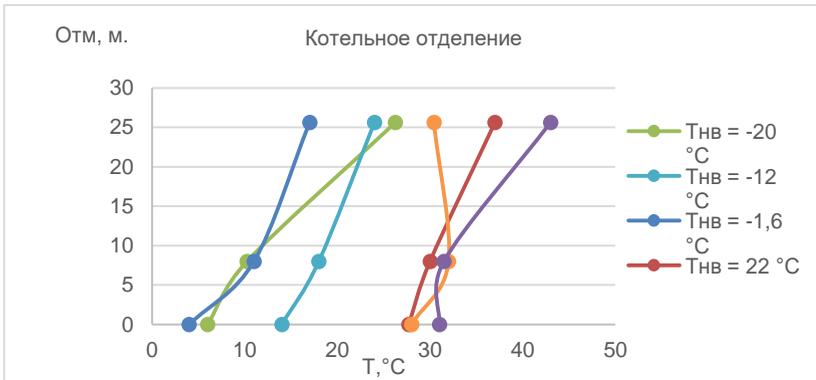


Рис.2. Распределение температуры по высоте котельного отделения в зависимости от температуры окружающей среды

В табл. 1 представлены средние отклонения параметров микроклимата на рабочих местах, турбинного и котельного отделений в зависимости от температуры окружающего воздуха. Средняя температура турбинного отделения вне зависимости от наружного воздуха, имела большее отклонение по температуре (на 18,48 °C) за счет больших тепловых потерь от тепловыделяющего оборудования. В котельном отделении температура внутри главного корпуса находилась ниже оптимальной и могла достигать 4 °C. В турбинном и котельном отделениях выявлены отклонения в среднем по температуре от оптимальной на 14,9 °C в теплый период и на 7 °C в зимний период года.

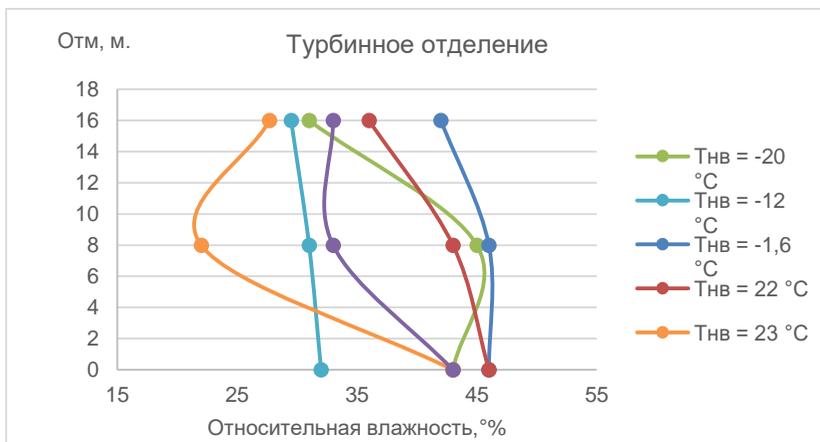


Рис.3. Распределение относительной влажности по высоте турбинного отделения в зависимости от температуры окружающей среды

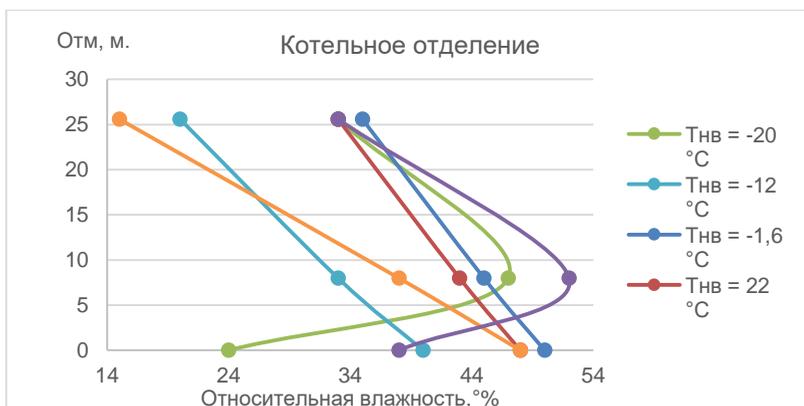


Рис.4. Распределение относительной влажности по высоте турбинного отделения в зависимости от температуры окружающей среды

Относительная влажность турбинного отделения имела отклонение в 3,7 % от оптимальной в теплый период и была оптимальной в холодный период. Для котельного отделения в тёплый период года относительная влажность в среднем была меньше оптимальной на 5,3 % и в холодный период относительная влажность была ниже оптимальных значений в среднем на 6,67 %. Наибольшее отклонение относительной влажности выявлено на рабочих местах оперативного персонала в

теплый период во время работ кондиционеров. На рабочих местах в теплый период было превышение температуры оптимальных значений на составило 5,2 °С при оптимальных значениях влажности. В холодный же период температура находилась в оптимальных значениях, но влажность была на 14,4 % ниже оптимальных значений [1].

Таблица 1. Средние отклонения параметров микроклимата в главном корпусе ИВТЭЦ-2 в зависимости от температуры окружающего воздуха

Отклонения	Параметр	ТО	КО	Рабочие места
Теплый период	Температура, °С	18,48	11,29	5,22
	Влажность, %	3,70	5,33	оптимально
	Скорость воздуха, м/с	н/д	н/д	н/д
	Содержание микрочастиц	н/д	н/д	н/д
	Плотность теплового потока, Вт/м	н/д	н/д	н/д
Холодный период	Температура, °С	9,56	4,50	оптимально
	Влажность, %	оптимально	6,67	14,44
	Скорость воздуха, м/с	н/д	н/д	н/д
	Содержание микрочастиц	н/д	н/д	н/д
	Плотность теплового потока, Вт/м	н/д	н/д	н/д

В настоящее время данные о скорости движения воздушных потоков в главном корпусе ТЭЦ-2, о значениях радиационных тепловых потоков и о качестве воздушной среды отсутствуют.

Выводы.

1. Экспериментальное исследование микроклимата на Ивановской ТЭЦ-2 показало наличие отклонений от нормативных значений по температуре и относительной влажности воздушной среды.

2. Измерения подвижности воздуха, величины радиационных потоков от оборудования и качества воздуха не проводились.

3. Для решения задачи оптимизации микроклимата на ТЭЦ-2 необходимо продолжить экспериментальное исследование всех параметров микроклимата с периодичностью один раз в квартал.

4. Необходимо разработать математическую модель главного корпуса Ивановской ТЭЦ-2 с целью оптимизации тепловоздушного режима в турбинном и котельном отделениях станции.

Литература

1. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений // 1996

2. РД 34.21.401-90 Методические указания по испытанию и наладке теплового режима главных корпусов ТЭС // 1991

УДК 66.047.7

В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор
М.Г. СУЛЕЙМАНОВ, аспирант,
Е.Н. БУШУЕВ, д.т.н., доцент
М.В. РОДИОНОВА, к.т.н.,
И.И. СВЕТУШКОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Графическое представление результатов моделирования в теплоэнергетике

Аннотация. Предложены номограммы для расчета параметров тепловой работы теплотехнологической установки (ТТУ) при решении прямой задачи – определение производительности ТТУ и параметров качества материала при заданной мощности источника теплоты и при решении обратной задачи – определение количества энергии для достижения требуемого качества материала при заданной производительности теплотехнологического агрегата.

Ключевые слова: теплотехника, теплотехнология, тепловая работа, математическая модель, качество материала, номограммы

V.V. BUKHMIROV, Doctor of Engineering,
M.G. SULEYMANOV, PhD student,
E..N. BUSHUEV, Doctor of Engineering,
M.V. RODIONOVA, Candidate of Engineering,
I.I. SVETUSHKOV, PhD student

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Graphical presentation of results modeling in thermal power engineering

Abstract. Nomograms are proposed for calculating the parameters of the thermal operation of a thermal processing unit (HTU) when solving a direct problem - determining the productivity of a HTU and material quality parameters for a given power of a heat source and when solving an inverse problem – determining the amount of energy to achieve the required material quality at a given productivity heat-technological unit.

Key words: heat engineering, heat technology, heat work, mathematical model, material quality, nomograms

Теплотехника – наука о методах и способах получения, транспорта и использования теплоты, а также о работе устройств, реализующих эти методы и способы [2] включает в себя Теплоэнергетику и Теплотехнологию [1]. Теплоэнергетика изучает тепловые процессы при получении электрической энергии (генерация) и тепловые процессы при непо-

средственном использовании теплоты в промышленности и в системах жизнеобеспечения человека (промышленная теплоэнергетика). Тепло-технология рассматривает способы использования тепловой формы энергии с целью изменения теплосодержания и физических свойств материала в быту и в теплотехнологических установках (ТТУ) – печах и сушилах. Тепловые процессы в ТТУ всегда являются нестационарными или квазистационарными (стационарными в конкретном сечении ТТУ, но изменяющиеся по ее длине) [1].

В докладе рассмотрен способ графического представления результатов расчета тепловой работы теплотехнологической установки, под которой понимаются совокупность теплообменных и массообменных процессов в рабочем пространстве ТТУ (в зоне генерации теплоты из других форм энергии) и в объеме материала. При этом материал, получая теплоту, изменяет свое теплосодержание (энтальпию) и, как следствие, физические свойства и возможно фазовое состояние. Важнейшими показателями ТТУ являются тепловая мощность W , Вт и производительность G , кг/с, а также удельный показатель затрат энергии на единицу продукции \mathcal{E} , Дж/кг при достижении заданных параметров качества (ПК) продукции. Тепловую работу ТТУ в общем случае можно описать в виде уравнения, которое связывает входные и выходные параметры установки и параметры качества материала при заданных прочих условиях однозначности (УО) процесса:

$$\Psi(W, G, \mathcal{E}, \text{ПК}, \text{УО}) = 0, \quad (1)$$

где Ψ – функция, моделирующая тепловую работу ТТУ (математическая модель); W – мощность ТТУ, Вт; G – производительность ТТУ, кг/с; \mathcal{E} – удельные энергетические затраты, Дж/кг; ПК – показатели качества материала на выходе из ТТУ; УО – условия однозначности, которые характеризуют особенности тепловой работы конкретной ТТУ (геометрию ТТУ, особенности ограждений, вид источника теплоты, геометрические размеры и структуру материала).

К показателям качества в теплотехнологическом процессе относят требуемую по технологии конечную температуру материала в заданной точке тела, перепад температур между двумя точками в объеме тела, конечную влажность материала и т.д.

Математическая модель тепловой работы ТТУ (1) по принципу получения может быть функциональной или детерминированной и основана на уравнениях любого класса (алгебраических, дифференциальных, интегро-дифференциальных). Но при этом должно выполняться главное требование, предъявляемое к любой математической модели, – она должна адекватно (достоверно) воспроизводить поведение объекта моделирования в заданной области изменения параметров, характеризующих тепловую работу ТТУ [4]. Математическая модель ТТУ (1) может быть реализована в виде

оригинального компьютерного кода или создана в среде одного из современных программно-вычислительных комплексов (ПВК).

При математическом моделировании в теплоэнергетике встает вопрос анализа получаемых результатов расчета, которые можно представить в виде графиков-номограмм, отражающих основные зависимости математической модели (1). При прямой постановке задачи математическая модель (1) принимает вид (2), а при обратной постановке – вид (3):

$$G = \Psi_1(W, \Delta T, PK, YO); \quad (2)$$

$$W = \Psi_2(G, \Delta T, PK, YO), \quad (3)$$

где Ψ_1 и Ψ_2 – математические модели при прямой и обратной постановках задачи расчета параметров тепловой работы ТТУ.

На рис. 1 показана номограмма, которая позволяет находить основные параметры тепловой работы при прямой и обратной постановках задачи, выполняя несложные графические операции.

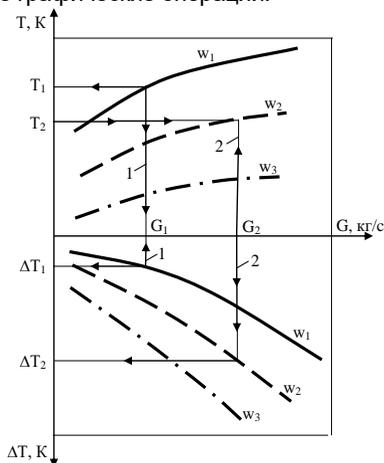


Рис. 1 Номограмма для расчета параметров тепловой работы теплотехнологической установки:

$W_1 > W_2 > W_3$, Вт – мощность источника тепловой энергии

Номограмма построена выполнением серии вычислительных экспериментов на математической модели теплотехнологической установки путем варьирования производительности печи, мощности источника тепловой энергии, в качестве которого может выступать электрическая энергия, электромагнитная энергия или химическая энергия органического топлива при заданных условиях однозначности конкретной ТТУ. Аналогичные номограммы можно построить для ТТУ с разной геометрией и для материала с разной структурой, влажностью и теплофизическими свойствами.

В качестве примера на номограмме рис.1 показано решение прямой (линия 1) и обратной (линия 2) задачи расчета параметров тепловой работы. При решении прямой задачи по заданной мощности источника теплоты находят производительность ТТУ и параметры качества материала в конце теплотехнологического процесса. В обратной задаче, наоборот, необходимо найти мощность тепловой энергии, которая требуется для достижения необходимой температуры материала при заданной производительности ТТУ. Второй параметр качества (на рис. 1 это перепад температуры в заданных точках материала) находят по графику в нижней части номограммы.

Замечание. Форма кривых на номограмме расчета параметров тепловой работы зависит от результатов математического моделирования конкретной теплотехнологической установки. В настоящей работе в качестве примера использованы результаты статьи [3], в которой рассмотрена тепловая работа газовой термической садовой печи для нагрева насыпных садов.

Выводы

1. Предложен инженерный метод расчета параметров тепловой работы теплотехнологической установки при помощи номограмм, которые получены расчетом на численной математической модели.

2. Инженерный метод расчета позволяет, не выполняя вычислений на компьютере, находить производительность ТТУ при заданной мощности источника теплоты или рассчитывать мощность источника теплоты, необходимого для достижения требуемой температуры материала при заданной производительности.

Литература

1. Ключников, А.Д. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки. Учебник для вузов / И.И. Перелетов, Л.А. Бровкин, Ю.И. Розенгарт и др.: Под ред. Ключникова А.Д. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 336 с.

2. Бухмиров, В.В. Тепломассообмен: учеб. пособие. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2014. – 360 с.

3. Бухмиров, В.В. Инженерный метод расчета тепловой работы нагревательной печи / В.В. Бухмиров, М.Г. Сулейманов, Е.Н. Бушуев, О.Б. Колибаба, Н.П. Гусенкова // Промышленная энергетика. 2022. № 10. С. 39-44.

4. Арутюнов, В.А. Математическое моделирование промышленных печей / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупеников. М.: Металлургия, 1990. 239 с.

УДК 66.047

Е.В. ГУСЕВ, к.т.н.
А.И. СОКОЛЬСКИЙ, д.т.н., доцент
А.А. СЕРГИЕНКОВА, соискатель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: gusev_pcm@mail.ru

К вопросу интенсификации термической обработки стеновой глинозольной керамики

Аннотация. В работе рассмотрены основные достоинства применения в составе керамических изделий видоизменной техногенных золоотвалных отходов гидроудаления Ивановской ТЭС-2 и основные обобщенные результаты по интенсификации процесса сушки глинозольных изделий.

Ключевые слова: глина, зола гидроудаления, состав, сушка, структура, температура, скорость, теплоотдача.

E.V. GUSEV, Ph.D.
A.I. SOKOLSKY, Doctor of Engineering, docent
A.A. SERGIENKOVA, applicant

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya, 34
E-mail: gusev_pcm@mail.ru

On the issue of intensification of heat treatment of wall clay-ash ceramics

Abstract. The paper considers the main advantages of using modified technogenic ash disposal waste from hydraulic removal of Ivanovskaya TPP-2 in the composition of ceramic products and the main generalized results on the intensification of the drying process of clay ash products.

Key words: clay, hydraulic ash, composition, drying, structure, temperature, speed, heat transfer.

Одним из направлений утилизации техногенных золоотвалных отходов гидроудаления ТЭС является их применения в производстве керамических изделий строительной индустрии. По своему химико-минералогическому составу видоизмененный золоотвалный материал приближаются к глинистому малопластичному веществу, имеет низкую чувствительность к сушке и по температуре и степени спекания относятся к высокотемпературному и неспекающемуся сырью [1].

В качестве исследуемого объекта термической обработки используется керамический композит полужесткого пластического формования различного состава, состоящий из легкоплавкого умеренно-пластичного

глинистого сырья и видоизмененных (тонкодисперсных) техногенных золоотвалных отходов гидроудаления Ивановской ТЭС-2.

Интенсификация процесса конвективной сушки капиллярно-пористых тел может осуществляться изменением термовлажностных и гидродинамических параметров термообработки и вещественного состава материала [1].

Комплекс полученных экспериментальных данных по кинетике сушки (кривые сушки и температурные кривые) пластинчатых глинозольных образцов (толщиной 10 мм) различного вещественного состава (Г:З, % масс.) при изменении их влажности в диапазоне 28÷3% в условиях симметричного обдува материала теплоносителем при различных его параметрах (температура – $t_c=75\div 125^\circ\text{C}$, скорость $V_c=1\div 5$ м/с) позволил выявить эффективные режимы термообработки.

С целью оптимизации кинетических данных был использован метод Красникова В.В., позволяющий все кривые сушки в отдельности для каждого состава объединить в одну общую кривую сушки (рис. 1) [2].

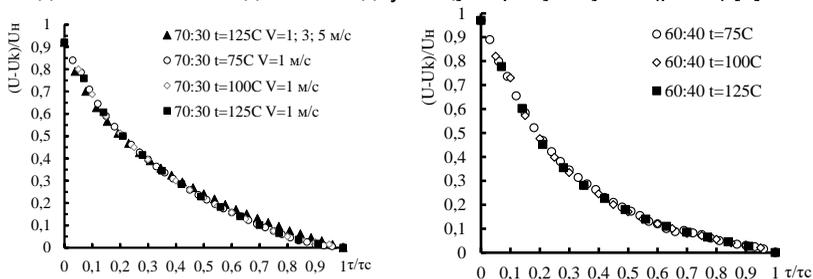


Рис. 1. Обобщенные кривые сушки глинозольной образцов

По кривым сушки образцов установлено, что с увеличением температуры и скорости теплоносителя и содержания золы в материале продолжительность термообработки существенно сокращается без проявления негативных деформаций (табл. 1).

Таблица 1. Экспериментальные данные по кинетике сушки глинозольной образцов различного состава при скорости теплоносителя $V_c=1$ м/с

Параметр	Г:З=90:10			Г:З=80:20			Г:З=70:30			Г:З=60:40		
	75	100	125	75	100	125	75	100	125	75	100	125
$U_{кр}, 10^2, \text{кг/кг}$	18,3	18	16,9	17	16	15	18	16,9	15	16	15	13
$N_f \cdot 10^3, \text{мин}^{-1}$	5,17	6,17	9,88	7,64	11,24	14,33	10,5	12,3	14,2	10	11,9	15
$\tau_c, \text{МИН}$	90	75	50	60	39	30	48	36	26	40	30	23

Методом приведенной скорости сушки установлена зависимость по продолжительности сушки, исключая влияние параметров теплоносителя и размеров влажного материала в виде выражения:

$$\tau_c = \frac{1}{N_I} \left[(U_n - U_{кр}) + A \left(\frac{U_{кр}^{-(m+1)} - U_k^{-(m+1)}}{m+1} \right) + B(U_{кр} - U_k) \right], \quad (1)$$

где $N_I = dU/dt$ - скорость сушки периода постоянной скорости, мин^{-1} ; $U_n, U_{кр}, U_k$ - средние величины начальной, критической и конечной влажности материала, %; **A, B** - структурные коэффициенты; **m** - параметр, отражающий энергию связи влаги с телом (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициенты **A, B, m** для различного состава изделий

Параметр	Г:З=90:10	Г:З=80:20	Г:З=70:30	Г:З=60:40
A	1462,4	1256,1	1079,5	884,1
B	1,038	1,065	1,1	1,124
m	1,767	1,652	1,535	1,392

Возможность интенсивности процесса сушки глинозольной керамики при повышении содержания золы и режимных параметров констатируют также полученные данные по теплообменным и массопроводным свойствам [2].

Для определения коэффициента теплоотдачи были использованы кинетические закономерности сушки с учетом выражения (рис.2)

$$q(\tau) = r_{исп} \rho_o R_o dU/d\tau + c_{пр} \rho_o R_o dt/d\tau = \alpha (t_c - t_{пм}), \quad (2)$$

где R_o - полутолщина пластины, м; $r_{исп}$ - удельная теплота испарения Дж/кг; $t_{пм}$ - температура поверхности материала, °С; $c_{пр} = c_M + c_{ж} U$ - приведенная теплоемкость влажного материала, Дж/(кг·град); $c_M = c_{ог} Xг + c_{оз} Xз$ - теплоемкости воды и сухого материала при содержании глины Xг и золы Xз.

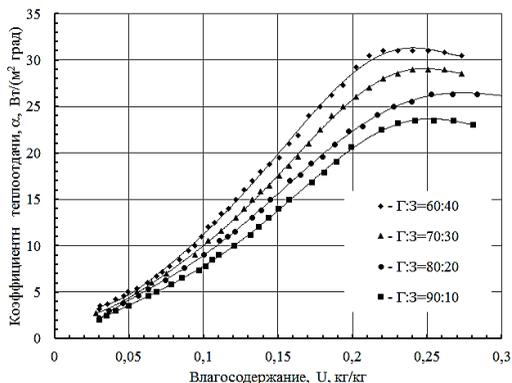


Рис.2. Кривые теплообмена глинозольных образцов различных составов при температуре $t_c=125^\circ\text{C}$ и скорости $V_c=1$ м/с воздуха

Полученные данные по кинетике сушки глинозольной керамики подтверждают возможность интенсификации удаления влаги из высушиваемого материала при повышении содержания золы и режимных параметров теплоносителя.

Литература

1. Сайбулатов С.Ж. Золой ТЭС в производстве строительной керамики / С.Ж. Сайбулатов, С.Т. Сулейменов, М. Кулбеков. – Алма-Ата: Казахстан, 1986. 260 с.
2. Гусев Е.В., Сокольский А.И., Сергиенкова А.А., Родякаева Ю.А. Закономерности формирования массопроводных свойств керамических изделий на основе отходов промышленных котельных // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2018. №1. – С.33–36.

УДК 66.021

Е.В. ГУСЕВ, к.т.н.
А.И. СОКОЛЬСКИЙ, д.т.н., доцент
А.А. СЕРГИЕНКОВА, соискатель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфakovская 34
E-mail: gusev_pcm@mail.ru

Подготовка формовочной золокерамической шихты способом пневматического распыливания

Аннотация. В работе рассмотрено обоснование применения способа пневматического распыливания для подготовки золокерамической шихты требуемой формовочной влажности для производства стеновой керамики.

Ключевые слова: распыливание, диспергирование, факел распыла, дисперсность капель-частиц, давление, расходы фаз, шихта, влажность.

E.V. GUSEV, Ph.D.
A.I. SOKOLSKY, Doctor of Technical Sciences, docent
A.A. SERGIENKOVA, applicant

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya, 34
E-mail: gusev_pcm@mail.ru

Preparation of the molding ash-ceramic charge by the method of pneumatic atomization

Abstract. The paper considers the rationale for using the method of pneumatic spraying for the preparation of ash-ceramic charge of the required molding moisture for the production of wall ceramics.

Key words: atomization, dispersion, spray torch, dispersion of droplets-particles, pressure, phase flow rates, charge, humidity.

В производстве керамических стеновых материалов стадия подготовки формовочной шихты определяет эффективность проведения

последующих технологических процессов формования и тепловой обработки. Повышение гомогенизации компонентов в шихте способствует сокращению продолжительности производственного цикла и улучшению качества промежуточной и готовой продукции [1].

Распыливание как один из способов подготовки шихты в керамическом производстве является по сравнению с механическим смешением компонентов наиболее эффективным, обеспечивая максимальную гомогенизацию формовочной смеси.

Пневматическое распыливание водной глинозольной суспензии по сравнению с механическим и гидравлическим является наиболее эффективным из-за малой зависимости качества диспергирования от расхода жидкой фазы и возможности управлять дисперсностью капель-частиц распыла и создания более тесной взаимосвязи соприкасающихся фаз [2-3]. Следует отметить, что при пневматическом распылении глинозольной суспензии наблюдается механическое отделение жидкой фазы в виде аэрозоли, способствуя существенному снижению формовочной влажности шихты.

Объектом исследования являлась 50% водная тонкодисперсная суспензия, состоящая из легкоплавкой глины (60%) и видоизменной золы гидроудаления (40%).

В качестве аппаратного оформления для проведения пневматического распыливания использовалось следующее основное оборудование: емкостной аппарат с лопастной мешалкой, поршневой компрессор, пневматическая форсунка с внешним смешением фаз (рис.1), емкость для улавливания влажной смеси. Регулирование дисперсности глинозольных капель-частиц и их влажности осуществлялось при помощи изменения технологических параметров (давления, расхода) газовой и жидкой фаз при их температуре 20°C.

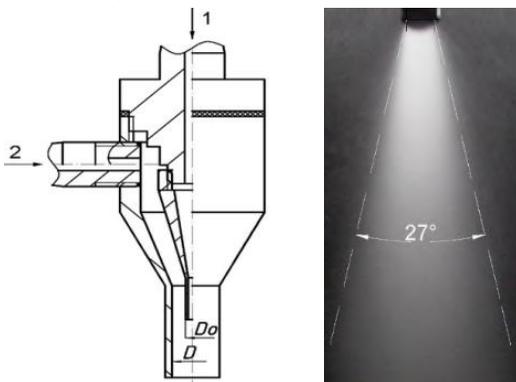


Рис.1. Схема конструкции форсунки и факела распыла:
1 – поток газа; 2 – поток водной суспензии

В процессе проведения исследования пневматического диспергирования 50% водной глинозольной суспензии в газовую среду определены средние размеры диспергированных капле-частиц распыла при различных соотношениях потоков суспензии и газа при давлениях распылительного агента (рис.2).

По экспериментальным данным установлена взаимосвязь среднего диаметра уловленных капле-частиц с технологическими параметрами процесса распыливания в виде следующего выражения [3]:

$$\frac{d_{\text{кап}}}{D} = 26,4 \left(\frac{P_{\text{ман}} + P_{\text{атм}}}{P_{\text{атм}}} \right)^{-0,45} \left(\frac{G_{\text{г}}}{G_{\text{с}}} \right)^{0,0416}, \quad (1)$$

где $d_{\text{кап}}$ – размер капли-частицы (100÷135), мкм; $P_{\text{ман}}$ – давление газа в форсунке (3÷6), ат; $G_{\text{г}}/G_{\text{с}}=(3,4\div 8,7)$ - соотношение массовых расходов газа и суспензии; $D=9$ мм - диаметр выходного отверстия форсунки.

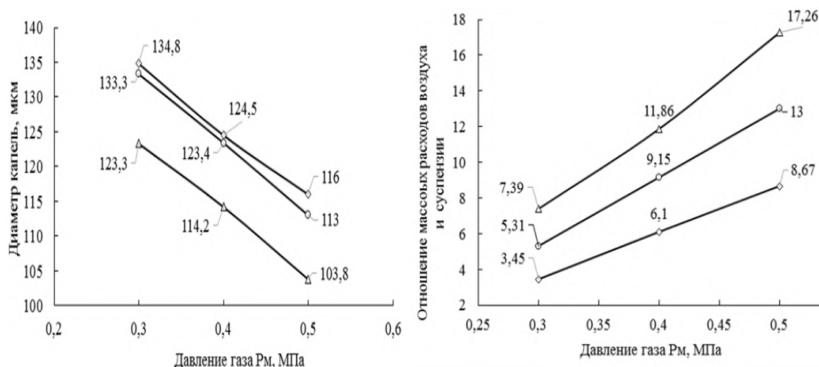


Рис. 2. Закономерности диспергирования водной суспензии при различных давлениях газа и отношениях массовых расходов фаз $G_{\text{г}}/G_{\text{с}}$.

Следует отметить, что в процессе холодного диспергирования суспензии в газовую среду наблюдается выделение потока водной аэрозоли от внешних границ факела. Установлено, что ростом давления и расхода газа происходит интенсивнее выделение аэрозоли и снижение влажности оседающих глинозольных капле-частиц (рис.3).

Следует отметить, что снижение влажности золокерамической шихты усиливается при использовании для диспергирования суспензии нагретого воздуха при меньших значениях давления газа за счет дополнительного испарительного обезвоживания.

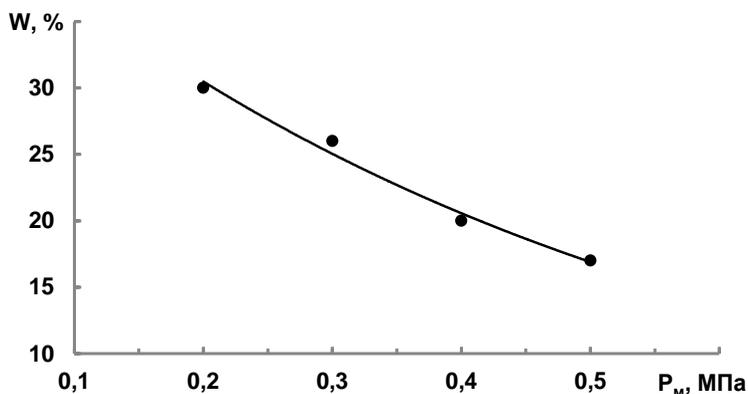


Рис.3. Интенсивность снижения влажности золокерамической шихты при холодном пневматическом распыливании

Полученные результаты позволяют рекомендовать способ пневматического распыливания 50% водной глинозольной суспензии для получения золокерамической шихты с требуемой формовочной влажностью в производстве стеновой и отделочной керамики.

Литература

1. Сайбулатов С.Ж. Зола ТЭС в производстве строительной керамики / С.Ж. Сайбулатов, С.Т. Сулейменов, М. Кулбеков. Алма-Ата: Казахстан, 1986. 260 с.
2. Пажи Д.Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д.Г. Пажи. В.С. Галустов. - М.: Химия, 1984. - 256 с.
3. Галустов В.С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике / В.С. Галустов. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 240 с.

УДК 699.86

Г.И. ПАРФЕНОВ аспирант,
В.М. ЗАХАРОВ, к.т.н., доцент
Н.Н. СМIRHOV к.т.н.,
В.В. ТЮТИКОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
E-mail: parfenovgip@gmail.com

**Имитационное моделирование теплообмена между
отделениями климатической камеры через стену
и оконный блок с теплоотражающими экранами**

Аннотация. В работе приведены результаты имитационного моделирования процесса теплопередачи через оконный блок с теплоотражающими алюминиевыми экранами. Оконный блок установлен в стену, разделяющую теплое и холодное отделения климатической камеры.

Ключевые слова: стеклопакет, оконный блок, теплоотражающие экраны, климатическая камера, двухмерная модель, теплопередача

G.I. PARFENOV postgraduate student,
V.M. ZAKHAROV PhD.,
N.N. SMIRNOV PhD.,
V.V. TYUTIKOV Doctor of Engineering

Ivanovo State Power University
153003, Ivanovo, st. Rabfakovskaya, 34
E-mail: parfenovgjp@gmail.com

Simulation modeling of heat transfer between the compartments of the climatic chamber through the wall and the window unit with heat-reflecting screens

Abstract. The paper presents the results of simulation modeling of the heat transfer process through a window block with heat-reflecting aluminum screens. The window block is installed in the wall separating the warm and cold compartments of the climatic chamber.

Key words: double-glazed window, window block, heat-reflecting screens, climate chamber, two-dimensional model, heat transfer

В строительной теплофизике особое внимание уделяется вопросам повышения тепловой защиты существующих и проектируемых зданий и сооружений [1]. «Слабым звеном» в тепловой защите являются светопрозрачные конструкции (СПК), обладающие наименьшим значением сопротивления теплопередаче. В качестве энергосберегающих решений предлагается увеличение количества слоёв остекления, применение теплоотражающих покрытий и металлических экранов, заполнение воздушных прослоек газами с низкой теплопроводностью, вакуумирование и т.д. Одним из наиболее рациональных энергосберегающих решений является применение теплоотражающих перемещаемых металлических экранов в СПК, которые значительно снижают тепловые трансмиссионные потери [2]. Экраны необходимо использовать в темный период суток или во время отсутствия людей в помещении.

В работе [2] были проведены экспериментальные исследования в климатической камере АНО "Ивановостройиспытания", подтвердившие высокую энергоэффективность применения экранов. Численное моделирование было выполнено только для светопрозрачной части окна в одномерной постановке с помощью эмпирических зависимостей в программе Matlab, в трехмерной постановке – в Phoenix с помощью метода конечных элементов. К сожалению, в моделях [2] было принято

допущение об адиабатности в зоне контакта стеклопакета с дистанционной рамкой.

Для учета процессов, происходящих в краевой части стеклопакета, в местах сопряжения стеклопакета и рамы, рамы и светового проема, была разработана имитационная модель процесса теплопередачи через оконный блок с экранами, установленный в стене, разделяющей теплое и холодное отделения климатической камеры (рис. 1).

Моделировали процесс теплопередачи через оконный блок, включающий в себя двухкамерный стеклопакет формулой СПД 4М₁-10-4М₁-10-4М₁ и деревянную раму. Со стороны холодного отделения размещали от одного до трех теплоотражающих экранов, выполненных из полированной алюминиевой фольги. Стена была выполнена в виде кирпичной кладки.

В ходе имитационного моделирования с помощью методов конечных элементов были определены локальные значения таких параметров как температура, скорость воздуха, удельный тепловой поток и сопротивление теплопередаче конструкции, построены параметрические поля (рис. 2).

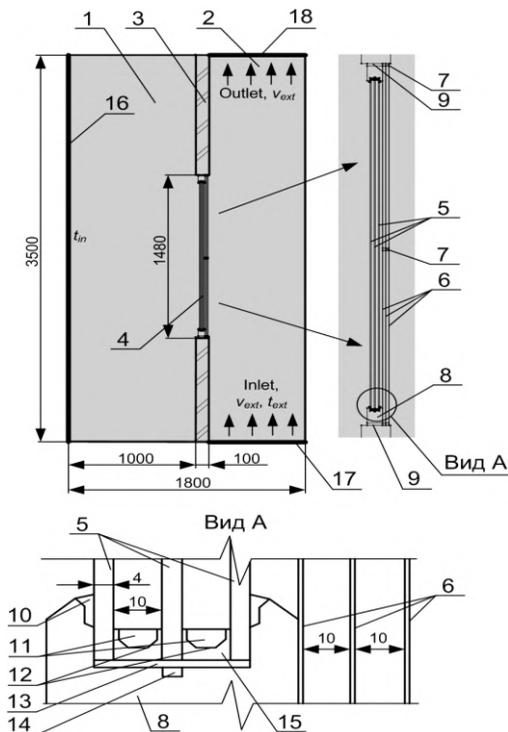


Рис. 1. Расчетная схема модели:

- 1, 2 – теплое и холодное отделения климатической камеры;
- 3 – кирпичная перегородка;
- 4 – испытуемый оконный блок;
- 5 – стекла;
- 6 – металлические экраны;
- 7 – разделительная пластиковая планка;
- 8 – деревянная рама;
- 9 – теплоизоляция из пенополиуретана;
- 10 – силиконовый герметик;
- 11 – осушитель;
- 12 – дистанционная рамка;
- 13 – пластиковая проставка;
- 14 – паз для вентиляции;
- 15 – герметик;
- 16 – "теплая" стена;
- 17, 18 – подача, отвод воздуха в отделение

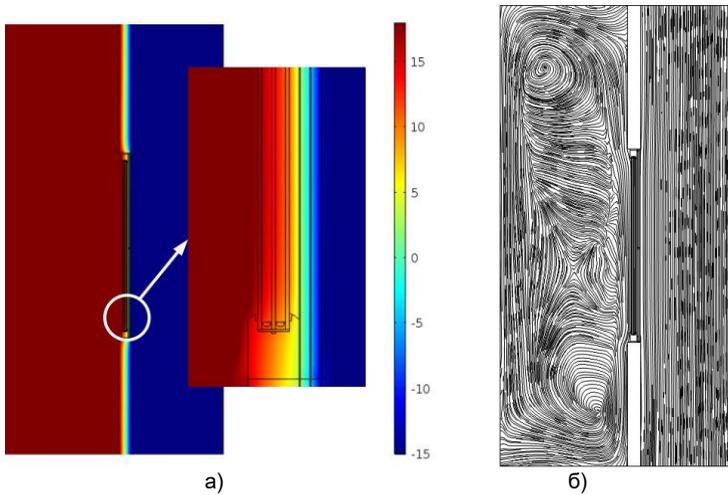


Рис. 2. Температурные поля (а) и линии потоков воздуха (б) в климатической камере (у оконного блока установлено 3 металлических экрана со стороны холодного отделения)

Относительная погрешность между результатами моделирования в COMSOL и данными лабораторного эксперимента, проведенного в климатической камере АНО "Ивановостройиспытания", для всех вариантов конструкций оконных блоков с теплоотражающими экранами не превысила 6,4 %. Выявлено положительное влияние от применения теплоотражающих экранов на увеличение как приведенного сопротивления теплопередаче окна, так и температуры его внутренней поверхности. Определен перепад температур на внутренней поверхности стеклопакета между центральной и краевой зонами.

Литература

1. Савин В.К. Строительная физика: энергоперенос, энергоэффективность, энергосбережение. – М.: Лазурь, 2005. – 432 с.
2. Смирнов Н.Н. Совершенствование систем по созданию динамического микроклимата для помещений с энергоэффективными светопрозрачными конструкциями // диссерт. ... канд. техн. наук: 05.14.04. – Иваново, 2022. – 333 с.

УДК 697.3

Н.С.МОЛЬКОВ, аспирант
О.Б.КОЛИБАБА, к.т.н., доцент
П.А.ШОМОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д.34
E-mail: nik-molk@yandex.ru

Методология определения класса энергетической эффективности здания на основе показаний приборов коммерческого учета тепла и электроэнергии

Аннотация. В работе представлен подход к определению класса энергетической эффективности здания, основанный на показаниях, полученных при работе коммерческого узла учета тепловой и электрической энергии, и приведена классификация классов энергоэффективности зданий. Описаны принципы методологии определения класса энергоэффективности здания.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, прибор учета тепла, методология, класс энергоэффективности.

N.S.MOLKOV, postgraduate
O.B.KOLIBABA, PhD, Associate Professor
P.A.SHOMOV, PhD, Associate Professor

Ivanovo State Power University
34 Rabfakovskaya str., 153003, Ivanovo
E-mail: nik-molk@yandex.ru

Methodology for determining the energy efficiency class of a building based on the readings of commercial heat and electricity metering devices

Annotation. The paper presents an approach to determining the energy efficiency class of a building based on the readings obtained during the operation of a commercial heat and electricity metering unit, and provides a classification of energy efficiency classes of buildings. The principles of the methodology for determining the energy efficiency class of a building are described.

Key words: energy efficiency, heat metering device, methodology, energy efficiency class.

Эффективное использование первичных энергоресурсов является неотъемлемой частью формирования конкурентноспособности выпускаемой продукции и формирования ВВП любой страны мира, в том числе и Российской Федерации.

На основании принятого 23 ноября 2009 года Федерального закона № 261-ФЗ (редакция от 13.07.2015 с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2016) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»

Федерации» [1] и Постановления Правительства РФ от 16.02.2008 N 87 (ред. от 27.05.2022) "О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию" [2] формируются принципы создания энергоэффективных зданий и сооружений городов. Вновь возводимые здания маркируются указателями, в соответствии с присвоенными им классами энергоэффективности. В табл. 1 представлена градация классов энергетической эффективности и потребление тепловой энергии на 1 м² площади здания в Российской Федерации и Германии.

Таблица 1. Градация классов энергетической эффективности

Кл. ЭЭ	Российская Федерация			Германия		
	Мощн. [кВт*ч/(м ² в год)]	Энергия [МДж/(м ² в год)]	Энергия [кг.у.т./(м ² в год)]	Мощн. [кВт*ч/(м ² в год)]	Энергия [МДж/(м ² в год)]	Энергия [кг.у.т/(м ² в год)]
A++	<82	<295	<10			
A+	82-103	295-371	10-13	<30	<108	<4
A	103-124	371-446	13-15	<50	<180	<6
B	124-144	446-518	15-18	<75	<270	<9
C	124-175	518-630	18-22	<100	<360	<12
D	175-207	630-745	22-25	<130	<468	<16
E	207-258	745-929	25-32	<160	<576	<20
F	258-310	929-1116	32-38	<200	<720	<25
G	>310	>1116	>38	<250	<900	<31
H				>250	>900	>31

В ходе проведения энергетических обследований зданий и сооружений на основании портативных измерительных устройств, таких как ультразвуковые расходомеры, контактные термометры для измерения температуры прямой и обратной магистрали системы теплоснабжения, регистраторы внутренней и наружной температуры, можно определять значение класса энергоэффективности здания. Недостатком данного способа является то, что измерения проводятся в краткосрочном интервале времени (сутки, неделя), так как данное оборудование не является стационарным. Тем не менее, данный способ позволяет определить класс энергоэффективности здания с определенной погрешностью. На основании ст.13 [1] к настоящему времени все жилые, административные и общественные здания и сооружения оборудованы узлами коммерческого учета тепловой и электрической энергии. Таким образом, появляется инструмент, который позволяет осуществлять мониторинг потребления тепловой и электрической энергии в течение года.

Необходимо обратить внимание, что с изменением климатических условий, как в центральной части России, так и в целом в мире, наблюдается кратное увеличение расхода электрической энергии в летний период за счет холодоснабжения общественных и жилых зданий. Исходя из этого, задача улучшения теплофизических свойств ограждающих

конструкций для жилых, общественных и промышленных зданий в зимние и летние периоды становится все более актуальной. На основании проведенных энергетических обследований можно констатировать, что здания, построенные в период 1960 - 1980 г.г., не соответствуют классам энергоэффективности А-В. К сожалению, вновь возводимые здания также нельзя отнести к данному классу энергоэффективности.

Фактический класс энергетической эффективности жилого и общественного здания можно определить по предлагаемой нами методике, основанной на показателях коммерческого узла учета тепловой и электрической энергии.

Суть методики заключается в следующем. На основании значений температуры наружного воздуха и фактического потребления тепловой и электрической энергии зданием, составляется тепловой баланс (1). Теплоступления от людей в расчетах не учитываются, т.к. выделяемая тепловая энергия одного человека находится в пределах от 60-100 Вт (зависит от массы тела).

$$Q_{\text{ПОТЕРЯ ЗДАНИЯ}} = Q_{\text{ПРИХОД ЭНЕРГИИ В ЗДАНИЕ}} = Q_{\text{ПОТРЕБЛЕНИЯ}} \quad (1)$$

Таким образом, зная суммарное потребление энергии, определяемое по (2), и, зная объем здания, можно определить удельное тепловое потребление энергии Вт/м³ в каждом месяце года.

$$Q_{\text{ПОТРЕБЛЕННАЯ}} = Q_{\text{ТЕПЛОВАЯ}} + Q_{\text{ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ}} \quad (2)$$

Зная этажность здания, можно определить удельное потребление энергии на 1 м² площади. Предлагается определять класс энергетической эффективности зданий на основании показаний коммерческих узлов учета.

Предложенная методика по определению класса энергетической эффективности позволяет получать интегральные и дифференциальные значения потребления, как энергетических ресурсов, так и изменения класса энергоэффективности в годовом, месячном и суточном разрезе.

В настоящее время на основе собранных статистических данных формируется алгоритм расчетной программы с использованием предлагаемой методики, позволяющий осуществлять мониторинг энергоэффективности здания в течении года.

Предложенная методология позволяет прогнозировать потребление энергетических ресурсов города в краткосрочной, среднесрочной и долгосрочной перспективе. Методология может быть использована для определения потребностей в тепловой и электрической энергии генерирующих систем ТЭЦ, КЭС и котельных региона [3]. Данная методика также позволит определить минимально-достаточные средства для санации зданий, которые построены во второй половине 20 века, и определить новые требования к проектируемым и строящимся в настоящее время зданиям.

Литература

1. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» - Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/

2. Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 N 87 (ред. от 27.05.2022) "О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию" – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_75048/

3. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: Учебник для вузов – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоиздат. 1982 - 360 с., ил.

УДК 697.11

А.Д.НЕУМОИН, аспирант
П.А.ШОМОВ, к.т.н., доцент
О.Б. КОЛИБАБА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д.34
E-mail: neu.art16@gmail.com

Проектирование энергетически эффективных общественных и гражданских зданий на основе технологии информационного моделирования

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы оценки энергетической эффективности зданий с применением технологии информационного моделирования, представлены результаты работы информационной модели.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, технология информационного моделирования, класс энергоэффективности.

A.D. NEUMOIN, postgraduate
P.A.SHOMOV, PhD, Associate Professor
O.B.KOLIBABA, PhD, Associate Professor

Ivanovo State Power University
34 Rabfakovskaya str., 153003, Ivanovo
E-mail: neu.art16@gmail.com

Design of energy efficient public and civil buildings based on information modeling technology

Abstract. The paper discusses the issues of assessing the energy efficiency of buildings using information modeling technology, presents the results of the information model.

Key words: energy efficiency, information modeling technology, energy efficiency class.

Увеличение потребления энергетических ресурсов в мире и рост их стоимости заставляют формировать новые принципы к энергоэффективности вновь проектируемых зданий и сооружений. По различным оценкам на долю жилищно-коммунального комплекса приходится до 40 % потребления первичных энергетических ресурсов.

Это обстоятельство приводит к необходимости проектирования и строительства энергетически эффективных зданий. Строительство энергоэффективных зданий позволит сократить потребление энергетических ресурсов и уменьшить вредные выбросы, в том числе парниковые газы. Технология информационного моделирования (ТИМ) является одним из инструментов, которая может быть использована для проектирования энергоэффективных зданий.

Подход к проектированию на основе технологии информационного моделирования позволяет создавать виртуальную модель здания, которая содержит информацию о его конструкции, материалах и инженерных системах. Виртуальная модель может быть использована для оценки в потребности энергетических ресурсов в летний и зимний периоды года для обеспечения микроклимата помещения в соответствии с САНПИН [1].

Один из ключевых аспектов проектирования энергетически эффективных зданий - это выбор изоляционных материалов. Технология информационного моделирования позволяет осуществлять выбор материалов на основе анализа стоимости, потребления энергии и других технических характеристик [2].

Моделирование позволяет провести анализ энергопотребления здания в целом. По результатам анализа можно определить и выбрать мероприятия по улучшению энергоэффективности здания. Такие программы позволяют сократить временные затраты и визуализировать проектную документацию. Здания, проектируемые по такой технологии, в будущем позволят заложить основы управления энергопотреблением здания и минимизировать необоснованные потери в окружающую среду. Существует большое количество зарубежных методик по оценке энергетической эффективности зданий. Ниже приведены некоторые из таких методик и программ:

Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) - это методика оценки энергетической эффективности зданий, которая учитывает набор критериев, включая энергопотребление, материалы и ресурсы.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) - это методика, которая определяет минимальные требования к проектированию, строительству и эксплуатации энергоэффективных зданий. ASHRAE определяет нормы для потребления энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха, а также для освещения и других потребителей энергии в здании.

EnergyStar - это программа, разработанная специалистами по энергосбережению, которая оценивает энергетическую эффективность

зданий и выдает им знак EnergyStar, если они соответствуют определенным требованиям. Эта программа является добровольной, и любое здание может быть оценено на соответствие ее требованиям.

В 2014 году в России появилась система по повышению энергоэффективности и экологичности зданий GREEN ZOOM [3]. Система создана с учётом зарубежного опыта, а именно систем сертификации BREEAM и LEED, но при этом GREEN ZOOM содержит критерии оценки, актуальные для России, с учетом российской практики проектирования и соблюдения требований СП.

Для оценки энергоэффективности здания с помощью моделирования используются следующие исходные данные: геометрия здания, материалы конструкций, инженерные системы и другие технические характеристики.

В качестве опытной модели для оценки энергетической эффективности принято офисное здание, территориально расположенное в городе Калуга (рис. 1). Информационная модель здания выполнена в программном комплексе Autodesk Revit. Модель здания имеет привязку к географическим координатам, конструктивные элементы модели кроме геометрических характеристик имеют множество атрибутивных свойств, таких как: материал, цвет, свойства покрытия и другие.

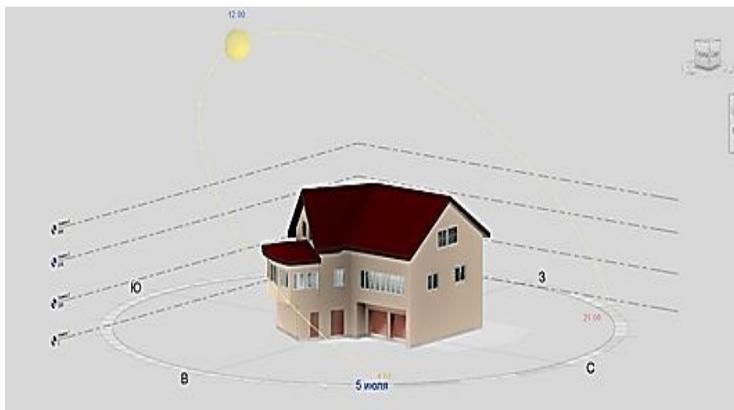


Рис.1. Модель здания, выполненная с применением технологии информационного моделирования

Программа позволяет проводить анализ инженерных систем здания и рассчитать потребление энергии. Полученные результаты визуализированы в виде графиков и таблиц, которые показывают потребление энергии для каждой системы здания. Для определения класса энергоэффективности здания можно провести различные сценарии расчетов, изменяя исходные данные. Результаты расчета анализируемой модели представлены на рис. 2.

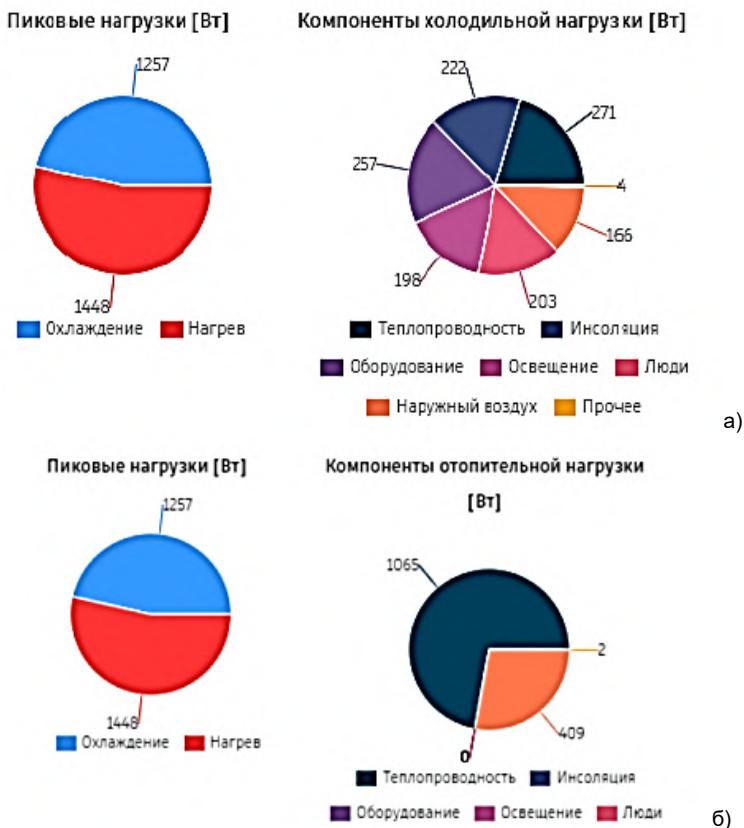


Рис.2. Диаграммы нагрузки систем кондиционирования (а) и отопления (б)

С помощью информационной модели получены данные инженерных систем здания: максимальное значение мощности на нагрев здания составляет 33,1 кВт, которое приходится на 14 февраля, а максимальное значение на охлаждение здания системой кондиционирования составляет 31,2 кВт на 8 августа. Мощность освещение всех помещений составила 3 196 Вт. Данная модель позволяет произвести расчет потребления энергии всех помещений здания, так называемых аналитических пространств. Результаты расчета нагрузок по офисному помещению, расположенному на 2 этаже представлены в виде сводных диаграмм на рис.2.

В программном комплексе Autodesk Revit для расчета энергетической модели здания применяется методика расчета в соответствии со

спецификациями ASHRAE Handbook of Fundamentals [4]. Используемая методика не позволяет применять результаты расчетов при разработке проектной документации, в части выполнения Раздела 10 (1) согласно Постановлению Правительства РФ N 87 от 16 февраля 2008 г. «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию». На основании Постановления Правительства РФ от 5 марта 2021 г. N 331 создание информационной модели на стадии проектирования в ряде случаев является обязательным, но при этом существует высокая потребность в программном обеспечении выполняющим расчет на соответствие действующим нормативам и стандартам, применяемым на территории РФ. В настоящее время ведется работа по созданию программных алгоритмов, позволяющих произвести оценку модели здания по требованиям СП50.13330.2012 «Тепловая защита зданий».

Задачей исследования является не только оценка здания на этапе его проектирования, но и разработка программных комплексов, позволяющих произвести расчет динамического коэффициента энергоэффективности существующих зданий и сооружений с внесением в модель данных по потреблению в реальном времени.

Литература

1. Чарикова И.Н. Информационные технологии в проектировании строительных систем: учебное пособие / И. Н. Чарикова, Н. Н. Манаева; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 154 с.

2. Л. А. Шилова Технологии информационного моделирования зданий: учебно-методическое пособие/ Е.В. Игнатова, Л.А. Шилова, А.Е. Давыдов ;Москва : Издательство МИСИ - МГСУ, 2019, - 55 с.

3. GREEN ZOOM: [сайт] / АНО «НИИУРС» - 2005 – URL: <https://greenzoom.ru/> - (дата обращения: 01.02.2022). - Текст : электронный.

4. Autodesk Revit: [сайт] / Autodesk Inc - 2023 – URL: <https://help.autodesk.com/> - (дата обращения: 01.02.2022). - Текст : электронный.

УДК 66.047.7

В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор

Д.В. РАКУТИНА, к.т.н.

Е.Н. БУШУЕВ, д.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Выбор оптимального режима сушки керамического кирпича

Аннотация. В работе выполнено экспериментальное исследование процесса сушки керамического кирпича в сушилах туннельного типа. Предложены рекомендации по выбору оптимального режима сушки кирпича.

Ключевые слова: сушка, керамический кирпич, экспериментальное исследование режима сушки, оптимальный режим сушки.

V.V. BUHMIROV, Doctor of Engineering,
D.V. RAKUTINA, Candidate of Engineering,
E.N. BUSHUEV, Doctor of Engineering

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Selection of optimal mode ceramic brick drying

Abstract. The paper presents an experimental study of the drying process of ceramic bricks in tunnel-type dryers. Recommendations for choosing the optimal mode of drying bricks are offered.

Key words: drying, ceramic brick, experimental study of drying mode, optimal drying mode.

Керамический кирпич, изготовленный пластическим формованием, содержит влагу, которая должна быть удалена для придания ему механической прочности. При сушке кирпича удаляется в среднем 85% влаги, а при обжиге – остальные 15%. Сушка керамического кирпича осуществляется в туннельных сушилах, работающих по противоточной тепловой схеме – сушильный агент движется навстречу вагонеткам с кирпичом. Из сушильного туннеля вагонетки с высушенным кирпичом загружаются в туннельную обжиговую печь. Сушка происходит горячим воздухом, забираемым из зоны охлаждения обжиговой печи.

Процесс сушки характеризуется следующими основными факторами: скоростью перемещения влаги внутри материала, скоростью влагоотдачи с поверхности материала в окружающую среду и усадочными напряжениями, обусловленными неравномерным распределением влажности внутри материала.

Процесс испарения и удаления влаги с поверхности изделия называют внешней диффузией. Скорость внешней диффузии зависит от температуры и влажности теплоносителя, а также от скорости его движения относительно высушиваемого изделия. В результате испарения влаги с поверхности изделия влага из глубинных слоев перемещается на его поверхность. Этот процесс называют внутренней диффузией. Если перепад влажности внутри изделия превышает допустимый предел, сырец растрескивается. Этот предел называют критическим перепадом влагосодержания или критическим градиентом влажности. Условия сушки кирпича должны быть такими, при которых образующийся в нем перепад влажности не превышал бы критического значения. Наилучшие условия сушки создаются при одинаковой скорости внешней и внутренней диффузии.

Допустимый градиент влажности определяется опытным путем, так как величина его не только различна для разных глин, но и не одинакова для одной и той же глины, если она высушивается в среде с различной температурой и относительной влажностью [1].

Таким образом для каждого вида кирпича существует оптимальный режим сушки, при котором сушильная установка обеспечивает заданную производительность с наименьшим удельным расходом теплоносителя и удельным расходом тепла при наименьшем выходе брака в процессе сушки.

В данной работе выполнена оптимизация режима сушки керамического кирпича на основе экспериментальных данных. Для этого было проведено измерение температуры и влажности сушильного агента по длине сушильного агрегата, а также температуры и влажности внутри кирпича.

Температуру и влажность сушильного агента - горячего воздуха измеряли прибором ИВТМ-7 через отверстия в девяти окнах, равномерно расположенных по длине сушилки в трех точках по высоте: у поверхности вагонетки между кирпичами, между профнастилом и кирпичом, над профнастилом. Также выполнено измерение температуры теплоносителя около кирпичей регистратором температуры ТЛ-01 справа и слева по ширине сушильных установок. Регистратор был установлен на расстоянии 0,12 м от пода вагонетки.

Измерение температурного поля внутри кирпича-сырца в процессе сушки выполнено с использованием хромель-алюмелевых термопар и многоканального измерителя-регистратора ИРТ-4. Прибор ИРТ-4 может эксплуатироваться при температуре окружающей среды не выше 50°C. Однако в процессе сушки кирпича температура на некоторых участках значительно превышает предельно допустимое для прибора ИРТ-4 значение. В связи с этим было сконструировано устройство с термостатом, предназначенное для измерения и регистрации параметров термообрабатываемых изделий при повышенных температурах окружающей среды (до 120°C) [3].

Важность кирпича была найдена весовым методом, суть которого заключается в определении уменьшения массы образца после сушки. Для мониторинга изменения влажности кирпича вдоль рабочего пространства сушильных печей из каждого окна брали по одному кирпичу, а также кирпичи до и после сушки.

Проведенное исследование показало, что влажность теплоносителя, двигающегося противотоком по отношению к садке кирпича, увеличивается от 25 до 90 %, а температурный режим сушки не соответствует режиму, рекомендованному по технологии. Перепад температуры теплоносителя по ширине сушильного канала достигает 25%, при этом более высокое значение температуры отмечено со стороны поступления горячего воздуха в рабочее пространство от рециркуляционных вентиляторов. Изменение температурного поля сушильного агента по длине сушильной печи происходит «скачками», что приводит к неравномерной усадке кирпича-сырца и как следствие к появлению трещин.

В период постоянной скорости сушки температура теплоносителя составляет 40°C и не превышает допустимое значение температуры кирпича-сырца на данном этапе сушки равное 50°C. Экспериментально также установлено, что в одинаковых по конструкции сушилах суще-

ственно отличается температурное поле сушильного агента, что объясняется нарушениями режима эксплуатации.

Выводы.

1. Разработаны рекомендации по оптимизации процесса сушки кирпича-сырца, внедрение которых привело к уменьшению брака с 8 до 2% за счет снижения скорости усадки кирпича и уменьшения его растрескивания.

2. Для выравнивания температурного поля теплоносителя по ширине вагонеток было предложено использовать реверс рециркуляционных вентиляторов, обеспечивающий периодическую смену направления движения горячего воздуха поперек туннеля сушилки. Для этого на потолке камеры смешения были установлены двигатели с ременной передачей к вентилятору, оснащенные электромеханическими тормозами. В результате появилась возможность регулировать режим работы рециркуляционных вентиляторов в широких пределах.

Литература

1. Бухмиров В.В., Гнездов Е.Н., Ракутина Д.В. Определение качества сушки и обжига кирпича по этапам технологического процесса // *Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее. К столетию со дня рождения М.А. Глинкова: Тр. III Междунар. науч.-практ. конф. (1-3 февраля 2006г., МИСиС).* – М.: МИСиС, 2006. – С. 211-215.

2. Кирпич и камни керамические. Технические условия. ГОСТ 530-95. – М.: Издательство стандартов, 1996.

3. Патент №48630 на полезную модель «Устройство для измерения и регистрации параметров термообрабатываемых изделий при повышенных температурах». Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 27 октября 2005г. / Гнездов Е.Н., Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Батуев М.И., Киселев В.В., Петров Е.В. – Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2005.

УДК 621.867.7:62-82

Е.Е. КОРОЧКИНА¹, к.т.н.,
И.Н. ПАХОТИНА², к.т.н.

Ивановский государственный энергетический университет¹
153003, г. Иваново, Рабфаковская, 34

Ивановский государственный политехнический университет²
153000, г. Иваново, Шереметьевский проспект, 21
E-mail:fmkee@yandex.ru¹, 89106973496@mail.ru²

Определение эффективности теплообмена в теплообменном аппарате гидропривода экскаватора при использовании регенерированного масла

Аннотация. В данной статье рассматривается методика оптимизации конструкции теплообменника для охлаждения рабочей жидкости гидравлического привода строительно-дорожных машин на примере экскаватора с использованием регенерированного масла.

Ключевые слова: теплообменник, гидропривод, оптимизация, экскаватор.

E.E. KOROSHKINA ¹, ph.d., assistant professor
I.N. PACHOTINA ², ph.d., assistant professor

Ivanovo State Energy University
Ivanovo, Rabfakovskaya, 34
Ivanovo State Polytechnic University
Ivanovo, Sheremetyevsky Avenue, 21
E-mail: fmkee@yandex.ru ¹, 89106973496@mail.ru ²

Determination of heat transfer efficiency in a heat exchanger when using regenerated oil

Abstract. This article discusses the technique of optimizing the desing of the exchanger for cooling the working fluid of the hydraulic drive of road-building machines on the example of excavator.

Key words: heat exchange, hydraulic drive, optimization, excavator.

В работе рассмотрен расчет теплообмена в теплообменном аппарате гидропривода экскаватора марки ЭО-214111, а также приводится расчет эффективности теплообмена при использовании в гидросистеме масла после его регенерации.

Целью регенерации является восстановление рабочих свойств использованного масла. Регенерация включает физическую и химическую обработку, в результате которой из масел практически полностью удаляются механические примеси, продукты старения, а также присадки, сохранившиеся в масле. В процессе регенерации получают базовые масла, из которых, после введения присадок, могут быть приготовлены товарные масла.

Регенерация – самый предпочтительный для окружающей среды способ утилизации жидких нефтеотходов, в том числе отработанных масел, который является экологически безопасным и способствует экономии ценного сырья.

Так как в гидросистеме циркулирует до 15 литров масла, то использовать регенерированное масло целесообразно. Цена масла достаточно высокая и утилизация отработанного масла наносит вред экологии.

Сравним результаты расчета эффективности теплообмена при использовании нового масла и масла после регенерации.

В гидросистеме экскаватора применяется воздушно-масляный теплообменник с устройством орошения. Для внедрения в гидравлическую систему экскаватора ЭО-412111 выбираем воздушно-масляный теплообменник серии MG AIR 2015K. Этот теплообменник состоит из радиатора, внутри которого циркулирует охлаждаемое гидравлическое масло, вентилятора – создающего воздушный поток через радиатор, защитного кожуха и термостата для поддержания температуры в уста-

новленном диапазоне [1]. Также к выбранной модели теплообменника устанавливается система орошения, состоящая из распылителей, расположенных между поверхностью теплообмена и вентилятора, в которую поступает охлаждающая жидкость посредством насоса, согласно разработанной математической модели теплообменника в патенте[2].

Определим теплоотдачу при переходном режиме течения жидкости в трубах

$$Nu_r = C \cdot Pr^{0.43} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \varepsilon_1, \quad (1)$$

где Pr - критерий Прандтля при $t=80^\circ\text{C}$, $Pr = 591$ [3]; $Pr_{ст}$ - критерий Прандтля для теплоносителя при температуре стенки; ε_1 - коэффициент, зависящий от соотношения длины участка трубы к диаметру трубы всасывающей гидролинии, $\varepsilon_1 = 1,22$ [5]; C – коэффициент, зависящий от режима течения жидкости, $C=8,3$ [3].

Коэффициент теплоперетдачи k_i , Вт/м².град, определим как

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot D_{lr}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{D_{2r}}{D_{1r}}\right) + \frac{1}{\alpha_{22} \cdot D_{2r}}} \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности стенки, $\lambda = 0,15$ Вт/(м*К).

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{449,23 \cdot 0,04} + \frac{1}{2 \cdot 0,15} \cdot \ln\left(\frac{0,0438}{0,04}\right) + \frac{1}{183,38 \cdot 0,0438}} = 1,205 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$$

Определим линейную плотность теплового потока q_l , Вт/м

$$Q_l = \pi \cdot D_{2l} \cdot k_i \cdot (t_c - t_b) \quad (3)$$

$$Q_l = 3,14 \cdot 0,5 \cdot 1,205 \cdot (75 - 35) = 151,348 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

Найдем температуру рабочей жидкости на выходе из теплообменника $t_{\text{ВЫХ}}$, °С

$$t_{\text{ВЫХ}} = t_{\text{ВХОД}} - \frac{q_l \cdot l \cdot n \cdot k}{G_{ж} \cdot c_s}, \quad (4)$$

где $t_{\text{ВХОД}}$ – температура рабочей жидкости на входе в теплообменник, °С, $t_{\text{ВХОД}} = 75^\circ\text{C}$; k -количество рядов труб, шт, $k = 4$ шт; n – количество труб в одном ряду, шт, $n = 9$ шт; $G_{ж}$ – массовый расход рабочей жидкости (масла), кг/с.

$$G_{ж} = Q \cdot \rho, \quad (16)$$

где Q – объемная подача насоса, л/мин, $Q = 79,8$ л/мин; ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³, $\rho = 860$ кг/м³.

$$G_{ж} = \frac{79,8 \cdot 10^{-3} \cdot 860}{60} = 1,14 \text{ кг/с.}$$

$$t_{\text{ВЫХ}} = 75 - \frac{151,348 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5 \cdot 9 \cdot 4}{1,14 \cdot 0,92} = 49 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Найдем мощность, развиваемую насосом N , Вт/с

$$N = Q \cdot \Delta P, \quad (5)$$

где ΔP - суммарные потери давления в теплообменнике МПа, $\Delta P = 0,0556$ МПа.

$$N = \frac{79,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,556}{60} = 0,74 \text{ Вт/с.}$$

При регенерации минерального масла его динамическая вязкость снижается на 15%. Определим тепловой поток от масла в окружающую среду в этом случае.

Определим теплоотдачу при переходном режиме течения жидкости в трубах

$$Nu_r = C \cdot Pr^{0.43} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \epsilon_1, \quad (6)$$

$$Pr_{ст} = \frac{\mu \cdot C_{рм}}{\lambda}, \quad (7)$$

где $C_{рм}$ — удельная теплоёмкость масла, кДж/(кг·К), $C_p = 1670$ Дж/(кг·К); μ — коэффициент динамической вязкости, Па·с, $\mu = 399,3$ Па·с; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град), $\lambda = 0,134$ Вт/(м·К).

Определим критерий Прандтля (при температуре стенки), $Pr_{ст}$

$$Pr_{ст} = \frac{334,305 \cdot 1670 \cdot 10^{-4}}{0,134} = 374,343$$

$$Nu_r = 8,3 \cdot (591)^{0.43} \left(\frac{591}{374,343} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot 1,22 = 182,91.$$

Определим число Пекле $Pe_{вг}$

$$Pe_r = \frac{V \cdot D_{lr}}{\lambda_{ж}}, \quad (8)$$

где V - скорость движения жидкости в канале, м/с, $V = 0,94$ м/с; D_{lr} - внутренний диаметр канала, м, $D_{lr} = 0,04$ м; $\lambda_{ж}$ — коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К), $\lambda_{ж} = 0,134$ Вт/(м·К).

$$Pe_r = \frac{0,94 \cdot 0,04}{0,134} = 0,2806$$

Найдем коэффициент теплоотдачи при переходном режиме течения жидкости в трубах α_1 , Вт/(м²·град)

$$\alpha_1 = \frac{Nu_r \cdot \lambda_{ж}}{D_{lr}}, \quad (9)$$

$$\alpha_1 = \frac{182,91 \cdot 0,134}{0,04} = 612,75 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}.$$

Коэффициент теплоотдачи k_i , Вт/м²·град, определим как

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot D_{lr}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \ln \left(\frac{D_{2r}}{D_{lr}} \right) + \frac{1}{\alpha_{22} \cdot D_{2r}}}, \quad (10)$$

где λ — коэффициент теплопроводности стенки, $\lambda = 0,15$ Вт/(м·К);

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{612,75 \cdot 0,04} + \frac{1}{2 \cdot 0,15} \cdot \ln \left(\frac{0,0438}{0,04} \right) + \frac{1}{183,38 \cdot 0,0438}} = 2,137 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}.$$

Определим линейную плотность теплового потока q_l , Вт/м

$$Q_l = \pi \cdot D_{2l} \cdot k_i \cdot (t_c - t_b) \quad (11)$$

$$Q_1 = 3,14 \cdot 0,5 \cdot 2,137 \cdot (75 - 35) = 134,204 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

При использовании масла поле регенерации коэффициент теплопередачи увеличился на 3%, а тепловой поток на 4%. Данное уменьшение динамической вязкости не ухудшает работоспособность гидропривода экскаватора, но улучшает работу теплообменного аппарата.

Литература

1. Свешников В.К. Гидрооборудование: Международный справочник. Кн. 3. Вспомогательные элементы гидропривода. Номенклатура, параметры, размеры, взаимозаменяемость. ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ». 2003. 445 с.

2. Альмохаммад Альнайф Мохаммад. Совершенствование систем приводов гидрофицированных машин для эксплуатации в условиях высоких температур. 05.02.02 – Автореф. дисс. на соискание уч. степ.канд. тех. наук. Братск 2015. 18 с.

3. Бухмиров В.В., Ракутина Д.В. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассобмен»/ФБГОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».- Иваново, 2017.- 120 с.

УДК 674.047.3

О.Б. КОЛИБАБА, к.т.н., доцент
Р.Н. ГАБИТОВ, к.т.н.,
Д.А. ДОЛИНИН, к.т.н.,
А.Н. БОРОДИН, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: koli-baba@mail.ru

Экспериментальное исследование сушки древесины с целью создания композитного топлива

Аннотация. В настоящее время актуальной задачей развития топливно-энергетических комплексов ряда стран является увеличение доли генерации за счет вовлечения в оборот твердого топлива. В ряду подобных проектов особо значимыми являются те, которые позволяют утилизировать отходы различных производств, в том числе деревообрабатывающих. При топливopодготовке древесных отходов стадия сушки является крайне энергозатратной, поэтому надежное прогнозирование ее кинетики во многом определяет эффективность всего технологического процесса. Проведенные экспериментальные исследования процесса конвективной сушки влажных древесных отходов позволили получить уравнения для нахождения критериев Нуссельта. Предложенные уравнения дают возможность более точно определить коэффициенты теплоотдачи, применяемые в расчетах режимных параметров сушильных установок.

Ключевые слова: конвективная сушка, древесные отходы, влажность, сушильный агент, критериальное уравнение, коэффициент теплоотдачи.

O.B. KOLIBABA, PhD,
R.N. GABITOV, PhD,
D.A. DOLININ, PhD,
A.N. BORODIN, student

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya, 34
E-mail: koli-baba@mail.ru

Experimental study of wood drying in order to create composite fuel

Abstract. Today an urgent task in the development of fuel and energy complexes in a number of countries is to increase the share of generation by involving solid fuel in the turnover. In a number of such projects, those that allow the disposal of waste from various industries, including woodworking, are especially significant. During the fuel preparation of wood waste, the drying stage is extremely energy-consuming, therefore, reliable prediction of its kinetics largely determines the efficiency of the entire technological process. The experimental studies of the process of convective drying of wet wood waste made it possible to obtain equations for finding the Nusselt criteria. The proposed equations make it possible to more accurately determine the heat transfer coefficients used in the calculation of the operating parameters of the dryer.

Key words: convective drying, wood waste, humidity, drying agent, criterion equation, heat transfer coefficient.

Одним из основных направлений утилизации древесных отходов является их использование для выработки тепловой и электрической энергии. В последние годы энергетическое использование древесных отходов рассматривается как альтернатива традиционным видам топлива [1, 2, 3]. Ресурсы древесных отходов оцениваются в 36 млн. м³ в год, что эквивалентно 59 млн. МВт/ч тепловой энергии, и позволяет заменить 7820 тыс. тонн мазута.

В рамках современных требований к экологичности промышленных производств разрабатываются новые законы, регламентирующие размещение самих производств, а также хранение и переработку отходов. Поэтому, задача поиска эффективных способов утилизации отходов становится актуальной. Здесь, в первую очередь, имеется в виду получение из отходов дополнительного продукта, такого как, топливо для котлов. Древесные отходы – это хорошее топливо с достаточно высокой теплотворной способностью, причем – это экологически чистое топливо с минимальным содержанием золы и вредных веществ.

Изготовление композиционных материалов в виде топливных гранул и брикетов является перспективным направлением в использовании отходов как топлива. Качество брикетов в значительной степени зависит от влажности исходной смеси. Сырье для прессования должно иметь влажность в пределах 6-12 % [4]. С повышением влажности калорийность брикетов снижается. Поэтому для получения качественного топлива необходима предварительно подготовленная по влажности древесина.

Процесс сушки является крайне энергозатратным, поэтому надежное прогнозирование его кинетики во многом определяет эффективность всего технологического цикла. Выбор и расчет энергоэффективного режима работы сушильной установки невозможен без проведения ряда экспериментальных исследований.

Трудности анализа внешнего тепломассопереноса теоретическими методами приводят к необходимости применения теории подобия с использованием опытных данных. При одновременном протекании процессов тепло- и массообмена наиболее применимым можно считать универсальное критериальное уравнение, полученное П.Д.Лебедевым [5], которое позволяет рассчитывать коэффициенты теплообмена для любого момента времени всего процесса сушки для большинства влажных материалов.

Целью данного исследования является получение на основе структуры зависимости [5] критериальных уравнений тепло – и массообмена, применимых для расчета процесса конвективной сушки измельченной древесины.

Были проведены экспериментальные исследования процесса конвективной сушки древесной щепы в трех температурных режимах при скоростях газового потока: 0.2 и 0.7 м/с. Первый режим сушки осуществлялся при постоянной температуре сушильного агента 100°C, второй и третий - при температурах 147°C и 167°C. На рис.1 приведена схема экспериментальной установки для исследования процессов тепломассобмена между древесным образцом и сушильным агентом (воздухом).

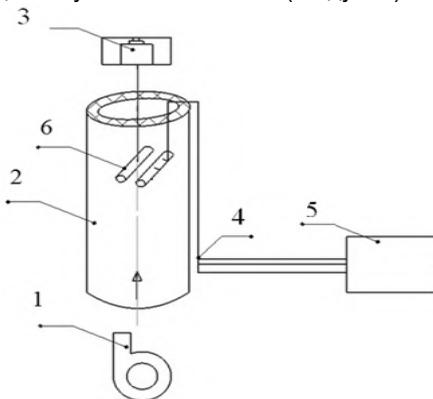


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – воздухоподогреватель; 2 – труба с изоляцией; 3 – весы; 4 – термопары ТХА(к); 5 – ПК; 6 – исследуемые образцы

Два образца длиной 150 мм и толщиной 30 мм помещали в трубу с изоляцией 2. По толщине образца размещали 3 термопары типа ТХА(К). Для получения правильного представления о поле температур образца особое внимание обращали на точность размещения термопар

4 в образце. Для исключения переноса теплоты через электроды термопары устанавливали с торца и размещали в изотермических поверхностях. Сигнал с термопар поступал на аналоговый модуль МВА-8 и далее обрабатывался на компьютере 5. Показания термопар фиксировали с интервалом времени в 15 секунд. Сушку образца выполняли до установления постоянства его массы.

На рис.2 приведены опытные данные изменения температуры образца и его влажности в процессе его сушки при температуре воздуха 100°C. Анализ результатов показывает, что первые 50 минут процесса сушки характеризуются высокой скоростью изменения и температуры, и влажности материала. В течение следующих 90 минут интенсивность удаления влаги не снижается, в то время как температура материала растет незначительно. В течение остальных 250 минут темп изменения температуры и влажности невелик.

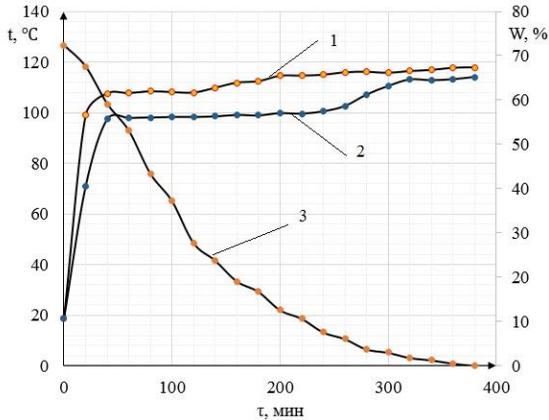


Рис. 2. Температура и влажность образца:

- 1 – температура на поверхности образца; 2 – температура в центре образца;
3 – относительная влажность материала

Опытные данные обрабатывали в виде критериальной зависимости:

$$Nu = A Re^n \left(\frac{T_c}{T_m} \right) E^n \quad (1)$$

где A – постоянный коэффициент; Re – число Рейнольдса; E – симплекс, учитывающий изменение влажности материала, т.е. влияние массообмена на теплообмен.

$$E = \frac{U_n - U_\tau}{U_n - U_k} \quad (2)$$

где U_n – начальное влагосодержание, кг/кг; U_τ – текущее влагосодержание, кг/кг; U_k – конечное (равновесное) влагосодержание, кг/кг.

Для ламинарного режима при $Re=450 \div 1100$, $T_c = 120 \div 170^\circ\text{C}$ и $E=0.15 \div 0.8$ рекомендуемое уравнение имеет вид:

$$Nu = 0.5Re^{0.33} \left(\frac{T_c}{T_m}\right) E^{-0.09} \quad (3)$$

За определяющий размер принят диаметр образца; за определяющую температуру - средняя температура сушильного агента.

На рис. 3 представлены графики зависимостей коэффициентов теплоотдачи от относительной влажности материала при $Re=560$.

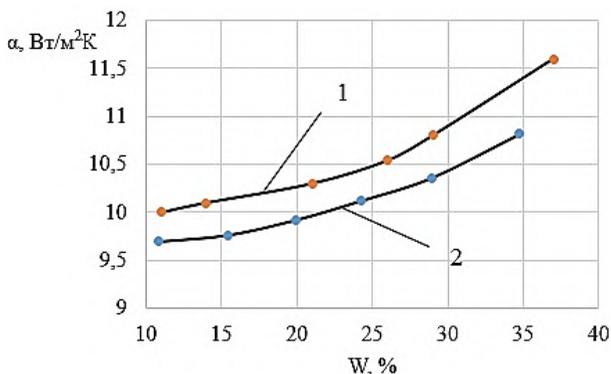


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от относительной влажности образца: 1 – коэффициент теплоотдачи при температуре сушки 167°C; 2 – при 147°C

Результаты анализа показывают, что в области $W = 10 - 38\%$ кривые имеют сходный характер. С уменьшением относительной влажности материала происходит плавное снижение величины коэффициента теплоотдачи.

Литература

1. Корсак, Е.П. Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь / Е. П. Корсак // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т.62, № 4. С. 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>. (дата обращения 15.03.2023)
2. Фортов, В.Е. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России / В.Е. Фортов, О. С. Попель // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 4–13.
3. Лосюк, Ю.А. Некоторые аспекты термохимической конверсии торфа / Ю.А. Лосюк, С.В. Жибрик, С.В. Корчиненко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2008. – № 5. – С. 60–66.
4. Головков, С.И. Энергетическое использование древесных отходов / С.И. Головков, И.Ф. Коперин, В.И. Найденев // М.: Лесная промышленность. 1987. 222 с.
5. Лебедев П.Д. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий [Текст] / П.Д. Лебедев, А.А. Щукин // М.: Энергия, 1970. – 408с.

УДК 628.474

О.И. ГОРИНОВ, к.т.н., доцент
А.В. ЧИБИСОВА, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфakovская 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Методика расчета производительности установок термической переработки порозных органических материалов

Аннотация. Проектирование и создание установок для термической переработки порозных органических материалов сопряжено с некоторыми трудностями, которые не способствуют их широкому распространению. Так, в частности, нет методик их расчета. Свойства порозных органических материалов ограничивают применение существующих методик и способов их термической переработки. Порозный материал - это слой состоящий из навала кусковых элементов различной конфигурации и размера. По-видимому, навал шаров одинакового диаметра можно считать идеальным порозным слоем.

Ключевые слова: термическая переработка, порозность, тепловой поток, термический реактор.

O.I. GORINOV, PhD, docent
A.V. CHIBISOVA, student

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya, 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Method of calculation of the productivity of installations for thermal processing of porous organic materials

Abstract. The design and construction of installations for the thermal processing of porous organic materials is associated with some difficulties that do not contribute to their wide distribution. So, in particular, there are no methods for calculating them. The properties of porous organic materials limit the use of existing techniques and methods for their thermal processing. Porous material is a layer consisting of a bulk of lumpy elements of various configurations and sizes. Apparently, a pile of balls of the same diameter can be considered an ideal porous layer.

Key words: thermal processing, porosity, heat flow, thermal reactor.

Теплообмен в теплотехнологических установках, в которых теплопередача к кусковому материалу осуществляется за счет движения теплоносителя по пустотам, является наиболее эффективным, по сравнению с другими способами конвективного теплообмена, и зависит от пропускной способности самого порозного слоя. Такой вид теплообмена осуществляется в теплотехнологических установках шахтного типа. Для порозного слоя органических материалов такой способ конвективного теплообмена может не подойти. В процессе теплообмена структура порозного слоя может оставаться неизменной или меняться.

В первом случае слой может состоять: из недеформируемых в процессе теплообмена кусков, (керамика, металл и т.п.) или деформируемых, но оставляющих твердый "скелет" слоя (кокс, дрова и т.п.). В этом случае пропускная способность слоя или остается неизменной или в процессе теплообмена будет изменена незначительно. Во втором случае куски слоя деформируются, могут слипаться, и существенно снижают пропускную способность или совсем его "запирают", тем самым значительно уменьшая и останавливая процесс теплообмена и термообработку в целом. К такому слою можно отнести материалы, которые в процессе нагрева размягчаются и слипаются - их называют аморфными. К ним, в частности, относятся твердые коммунальные отходы (ТКО), которые по своей структуре представляют порозный слой, содержащий в большом количестве полиэтиленовые компоненты, размягчающиеся и слипающиеся при нагреве. Таким образом термопереработку ТКО шахтным способом можно осуществлять только при непрерывном перемешивании самого слоя, что соответственно, усложняет конструкцию теплотехнологической установки. Нами разработаны конструкции теплотехнологических установок для термопереработки ТКО шахтного [1] и камерного [2] типов, в которых тепловая энергия на поверхность слоя поступает излучением от радиационных труб.

Производительность установок по термопереработки порозных органических веществ - это уменьшение массы сырья в единицу времени, т.е. это по сути скорость термопереработки. В [3], нами получено выражение, по которому можно определить скорость термопереработки из условия, что элементарная площадка термоперерабатываемой поверхности dF перемещается по нормали за время $d\tau$ на расстояние dx . Скорость термопереработки выражается как

$$w = \frac{dx}{d\tau} = \frac{dx}{d\tau} \frac{dF}{dF} \quad (1)$$

Выражение (1) является удельной (объемной, на единицу площади термоперерабатываемой поверхности) производительностью, имеющей размерность $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$.

Поверхность порозного слоя, в виду его пещеристой структуры является не ровной и состоит из впадин и бугорков (рис. 1а).

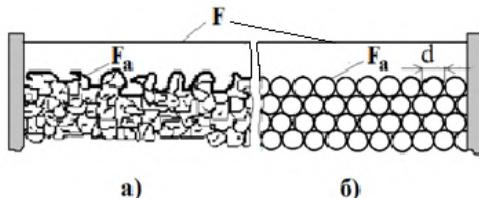


Рис.1. Структура порозного слоя ТКО: а) пещеристая (хаотическая); б) составленная из шаров эквивалентного диаметра

Поэтому истинная или активная поверхность F_a порозного слоя, на которой происходит процесс термопереработки, несколько больше геометрической F . При проектировании термоперерабатывающих установок, в расчетах их производительности величину F_a необходимо определять. Порозный слой можно представить в виде шаров (рис.1б) с одинаковым диаметром d . Для слоя ТКО существует понятие эквивалентного диаметра. По данным "НИИСТРОМКОМПОЗИТ" эквивалентный диаметр частиц слоя ТКО можно принимать равным $d_s=0.05$ м. при коэффициенте формы частиц, примерно равным $\Phi=0,26$.

Если выделить участок размером 1×1 м (1м^2), состоящим из одного слоя шаров диаметра d , то на нем их поместится в количестве $1/d^2$ штук.

Площадь поверхности всех шаров одного слоя составляет

$$\frac{1}{d^2} \cdot \pi d^2 = \pi, \text{м}^2$$

Можно заметить, что площадь поверхности порозного слоя, состоящего из шаров одинакового диаметра, не зависит от диаметра самого шара и остаётся величиной постоянной и равной π .

Плотность теплового потока, поступающего на поверхность шара величина переменная. Так до середины шара тепловой поток будет иметь максимальное значение далее убывать до минимального. Поэтому, не вдаваясь в углубленные расчеты, связанные с лучистой алгеброй, можно считать, что плотность теплового потока будет величиной постоянной и действующей только на $2/3$ части поверхности шара или лучше взять величину. Тогда площадь активной поверхности порозного слоя выразится равной $2/\pi$, м^2 или

$$F_a=2F \quad (2)$$

Величина F_a является важной характеристикой в конструировании различного вида установок термической переработки органической массы, сочетающих в себе полный цикл термических процессов: пиролиз органической массы; газификация твердого углеродистого остатка (парокарбона), горение части термогаза для обеспечения тепловой энергией всей установки.

Таким образом объёмная производительность термоперерабатывающей установки выразится как, $\text{м}^3/\text{с}$

$$P = W \cdot F_a \quad (3)$$

По величине активной поверхности, при заданной производительности, определяется геометрическая площадь термоперерабатываемой поверхности термического реактора и, исходя из этого, его конструктивные размеры.

Литература

1. Патент № 2010112399 Установка для термического разложения несортированных твердых бытовых отходов.
2. Патент № 2672280 Мобильная установка для термической переработки твердых коммунальных отходов на полигоне.

3. Температурные поля и скорости энергетической утилизации твердых коммунальных отходов/ О.И. Горинов, О.Б. Колибаба, С.Э. Шавадзе/ Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики: 1 Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием (г. Ульяновск, 6-7 октября 2021): сборник трудов конференции [электронный ресурс]:-Ульяновск: УлГТУ.-2021.-с.23-27.

УДК 620.92

А.В. СОЗИНОВ¹, технический директор
Т.Е. СОЗИНОВА², к.т.н., доцент,
Н.С. ВЛАДИМИРОВ², студент

ОАО «ПСК»¹
153007, г. Иваново, м. Минеево, КРАНЭКС
E-mail: sozinov.albert@yandex.ru
Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина²
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: ste@tef.ispu.ru, nikita-vladim2402@yandex.ru

Организация системы охлаждения технологического оборудования

Аннотация. Рассмотрена система охлаждения технологического оборудования с помощью грунтового теплообменного резервуара с целью оптимальной работы производственной установки.

Ключевые слова: грунтовой теплообменный аппарат, система охлаждения производственной установки.

A.V. SOZINOV¹, technical director
T.E. SOZINOVA², Candidate of Engineering, docent,
N.S. VLADIMIROV², student

OSK «PSK»
153007, Ivanovo, p. Mineevo, KRANEKS
E-mail: sozinov.albert @yandex.ru
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: ste@tef.ispu.ru, nikita-vladim2402@yandex.ru

Organization of the cooling system of technological equipment

Abstract. Considered the cooling system of technological equipment with the help of an underground heat exchange **reservoir** in order to optimize the operation of the production plant.

Key words: ground heat exchanger, cooling system of the production plant.

Охлаждение технологического оборудования является одной из важных задач в организации качественного производственного процесса. Часто на производстве нет потребности использования теплоты охлаждающего теплоносителя. Таким образом, возникает необходимость «утилизации» так называемого паразитного тепла.

Для выработки холода на промышленных предприятиях чаще всего используются холодильные машины парокompрессионного типа. Данные установки включают в себя два теплообменника (испаритель и конденсатор) и компрессор, обеспечивающий циркуляцию холодильного агента. Установка такой машины может потребовать значительных капитальных затрат, а также увеличить эксплуатационные затраты на привод компрессора. В связи с этим возникает необходимость поиска менее затратных способов организации охлаждения. В качестве такого способа предложено использование естественного холода грунта.

Цель работы заключается в расчёте системы охлаждения по замкнутому циклу, по которому вода после охлаждения промышленной установки поступает в верхнюю часть резервуара, выполненного из стальной трубы и заглублённой в грунт. Охлаждённая грунтом вода забирается из нижней части резервуара и снова используется для охлаждения установки. Схема установки представлена на рис. 1. расчётная область состоит из подземного резервуара и неограниченного грунта.

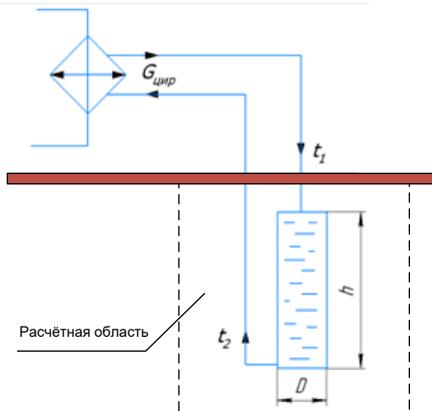


Рис.1. Система охлаждения с грунтовым теплообменником

Исходные данные, определенные требованиями технологического процесса:

1. Температура воды на входе в грунтовой теплообменный резервуар: $+ 29\text{ }^{\circ}\text{C}$;
2. Требуемая температура воды на выходе из грунтового теплообменного резервуара: $+ 14\text{ }^{\circ}\text{C}$;
3. Расход технологической воды: $0,4\text{ м}^3/\text{ч}$.

При моделировании теплопереноса принимали следующие допущения: перенос теплоты происходит только теплопроводностью; отсутствуют источники (стоки) теплоты внутри расчетной зоны; осесимметричное распределение температуры; идеальный контакт поверхности

стальной трубы и грунта. С учетом переноса теплоты в радиальном и продольном направлениях дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат имеет вид [1]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(\lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (1)$$

За начальное условие для неработающего подземного резервуара принимали прямолинейное распределение температуры по его глубине, а при расчете переходного режима из одного квазистационарного состояния в другое — температурное поле предыдущего квазистационарного состояния. На поверхности грунта задавали граничное условие III рода, на внешней границе расчетной зоны было задано геотермическое распределение температуры. В нижней части расчетной зоны резервуара температура была принята равной температуре грунта на данной глубине, а на внутренней поверхности скважины задавали граничное условие I рода. Внутри расчетной области на границе контакта резервуара и грунта предусмотрено задание граничных условий при допущении идеального контакта (граничное условие IV рода).

С течением времени в процессе теплообмена грунт теряет способность отводить теплоту, поэтому расчёт с использованием известных инженерных методик для нестационарных процессов представляет особую сложность. Расчёт проводили с помощью COMSOL Multiphysics 5.6 в двумерной постановке задачи расчёта переноса теплоты.

Для рационального выбора размеров расчётной области предварительно провели анализ зависимости температуры на выходе из резервуара от толщины грунта. За пределами расчётной области равной 5 м, изменение температуры изменяется незначительно, поэтому для дальнейших расчётов ограничились данным значением, и тем самым значительно сократив вычислительные ресурсы.

Для выбранного значения расчётной области провели нестационарное исследование с целью определения времени, в течение которого в резервуаре температура в нижнем сечении не будет превышать 14 °С.

Моделирование первого цикла работы резервуара после длительного простоя показало, что один резервуар не способен обеспечить стабильное охлаждение воды, более того такая конструкция имеет очень низкую производительность: охлаждение воды до необходимой температуры не достигается за разумное время, поэтому необходима интенсификация с помощью оребрения.

Предполагаемое оребрение представляет собой использование продольных рёбер, как наиболее простых в технологическом исполнении.

Вывод: использование вертикальных резервуаров для охлаждения воды, поступающей от технологического оборудования возможно. При этом для охлаждения 0,4 м³/ч технологической воды с помощью подземных теплообменных устройств необходимо использовать 10 резервуаров диаметром 1 м и глубиной 10 м работающих поочередно.

Литература

1. Бухмиров В.В. Тепломассообмен: Учеб. пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 360 с.

2. Сайт компании разработчика пакета COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.comsol.com>.

УДК 621.867.7:62-86

Е.Е. КОРОЧКИНА¹, к.т.н.,
О.В. БЛИНОВ², к.т.н.,
К.А. ЛЁТИН³, студент

Ивановский государственный энергетический университет
153003г. Иваново, Рабфаковская, 34
E-mail: fmkee@yandex.ru¹, oleg_blinov@ro.ru², letinkir@mail.ru³

Определение оптимального расстояния между процессорами суперкомпьютеров для минимизации перегревов

Аннотация. Рассмотрены частные вопросы моделирования теплового режима в суперкомпьютерных системах. Построены модели температурных полей процессоров, используемых в системах управления и влияющих друг на друга; получены соответствующие графические зависимости.

Ключевые слова: процессор, численный эксперимент, температурное поле.

Е.Е. KOROSHKINA¹, ph.d., assistant professor
O.V. BLINOV², ph.d., assistant professor
K.A. LETIN³, student

Ivanovo State Energy University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya, 34
E-mail: fmkee@yandex.ru¹, oleg_blinov@ro.ru², letinkir@mail.ru³

Determination of heat optimal distance between supercomputer processors to minimize overheating

Abstract. The issues of modeling the thermal regime in supercomputer systems are considered. Models of temperature fields of processors are constructed/ Graphic dependencies are obtained.

Key words: finishing equipment, process parameters, CPU cycles, numerical simulation, temperature field.

При работе радиоэлектронной аппаратуры суперкомпьютерных систем важно, чтобы тепловыделяющие элементы не перегревали друг друга. Для этого их нужно разместить на оптимальном расстоянии друг от друга. Вопросы охлаждения радиоэлектронной аппаратуры имеют решающее значение для её эффективной работы, а так же для экономии энергии на охлаждения. Так как на охлаждение управляющих процессоров затрачивается большое количество энергии. Оптимальное

расположение тепло выделяющих элементов позволяет экономить энергию на охлаждение.

Нами разработана тепловая модель, состоящая из четырёх процессоров с внутренними источниками теплоты, которые влияют друг на друга. Произведен расчет температурного поля каждого элемента и результирующего температурного поля для четырёх объектов, расположенных на различных расстояниях друг от друга.

Численный эксперимент был произведен для четырёх процессоров электронных вычислительных устройств: IntelCorei3, IntelCorei5 и IntelCorei7.

На первом этапе создания модели проводилось твердотельное моделирование объекта и была создана конструкция, состоящая из четырёх элементов, находящихся в корпусе. Твердотельное моделирование было проведено в САПР Solid Works. [1]. Эскиз для получения базового тела представлен на рис. 1.

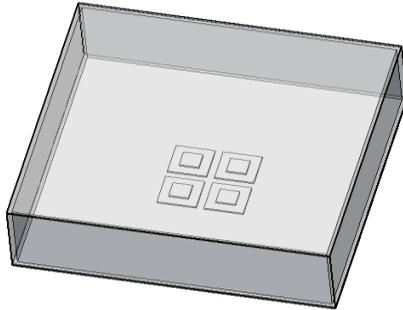


Рис.1. Детали в сборке

При работе со сборкой, разработчик может по мере необходимости создавать новые детали, определяя их размеры и расположение в пространстве относительно других элементов сборки.

Расчет температурного поля модели проводились в среде FlowSimulation.

В качестве исходных данных были заданы следующие величины: – граничные условия 3 рода на внешних стенках; T_0 – начальная температура объекта ; α - коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; q_v - удельная мощность поверхностного тепловыделения через единицу площади; Q - мощность тепловыделения через всю внешнюю поверхность модели [2] .

Так же задаются параметры, влияющие на расчетную сетку и критерии завершения расчета, а значит, и на точность решения задачи.

Результаты расчетов для процессора Intel Core i3 приведён на рис. 2.

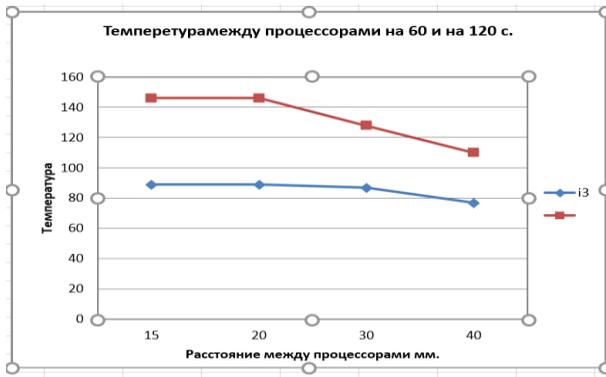


Рис. 2. График изменения температуры между процессорами i3.

В итоге мы построили график изменения температуры между процессорами зависимости от расстояния между ними для двух временных слоёв.

Результаты расчетов для процессора :Intel Core i5 и i7 приведён на рис. 3.



Рис. 3. График изменения температуры между процессорами i5 и i7.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что температура между процессорами и для Intel Core i3 на расстоянии 15 и 20 мм, а для Intel Core i5 и i7 не меняется на расстоянии между процессорами 10 и 15 мм [3].

Литература

1. Алямовский, А.А. Собачкин А.А., Одинцов Е.В., А.И. Харитонович А.И., Пономарёв Н.Б. SolidWorks 2007/2008 Компьютерное моделирование в инженерной практике. Санкт Петербург: БВХ - Петербург, 2008, 543 с. ISBN: 978-5-9457-994-5.

2. Дульнев Г.Н., Польшиков Б.Б. Тепловое моделирование электротехнических устройств //Инж. физ. журн., 1981, №6. – с. 1062-1069.

3. Калинин Е.Н. Кузнецов В.Б., Корочкина Е.О моделировании температурных полей процессоров в системах управления текстильного отделочного оборудования (статья).- Сборник материалов SMARTEX 2016, с.294-297

УДК 661.961

И.Г. ФИЛИППОВ¹ аспирант,
ХАЛИД ЭЛЬ-ШЕЙХ¹ ст. преподаватель,
К.А. ПЛЕШАНОВ¹ к.т.н.
Г.А. РЯБОВ² д.т.н.,

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Россия
E-mail: FilippovIG@mpei.ru
²ОАО «ВТИ»

115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 14, Российская Федерация

Производительность газификации биомассы с получением синтез-газа с использованием Aspen Plus из отечественного сырья

Аннотация. В этом исследовании предлагается заслуживающая доверия расчетная модель, на которой можно выполнять анализ чувствительности газификации с нисходящим потоком, в установке по производству водорода, с моделированием процесса в программе Aspen Plus. Изучается влияние основных элементов на состав синтез-газа, теплотворную способность синтез-газа и выработку водорода, а затем выбираются наилучшие условия для максимального получения водорода. Модель была оценена с использованием экспериментальных и других модельных данных и признана достаточно точной. Результаты анализа чувствительности, полученные при использовании простого воздуха в качестве газифицирующего агента, показывают, что более высокие температуры предпочтительны для газообразного продукта с большим содержанием водорода и теплотворной способностью. Кроме того, использование пара в качестве газифицирующего агента повышает содержание водорода и теплотворную способность газа. по сравнению с использованием воздуха в качестве газифицирующего агента. Наконец, результаты показывают, что идеальными условиями для максимального получения водорода при газификации опилок нисходящим потоком являются 800 °С для газификатора и 0,6 °С для SBR.

Ключевые слова: Газификация биомассы, синтез-газ. Биотопливо.

I.G. FILIPPOV¹ postgraduate,
KHALID EI-SHEIKH¹ senior Lecturer,
K.A. PLESHANOV¹ Ph.D. in Technology Head of Department
G.A. RYABOV² Doctor of Technical Sciences, Department Head

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
14, Krasnokazarmennaya street, Moscow 111250, Russia Federation
E-mail: FilippovIG@mpei.ru
²JSC «VTI»

14 Avtozavodskaya str., Moscow, 115280, Russian Federation

Productivity of biomass gasification with synthesis gas production using aspen plus with domestic raw materials

Abstract. In this study, a credible computational model is proposed on which it is possible to perform sensitivity analysis of downstream gasification in a hydrogen production plant, with process modeling in the Aspen Plus program. The effects of major elements on syngas composition, calorific value of syngas, and hydrogen generation are explored, and then the best conditions for maximal hydrogen production are extracted. The model is evaluated using experimental and other modelling data and found to be quite accurate. The sensitivity analysis findings obtained by employing simply air as a gasification agent show that higher temperatures are preferable for a product gas with a greater hydrogen content and calorific value. Furthermore, using steam as a gasifying agent raises the hydrogen content and heating value of the gas, as compared to using air as a gasification agent. Finally, the results suggest that the ideal conditions for maximum hydrogen generation from sawdust downdraft gasification are 800 C for the gasifier and 0.6 for the SBR.

Key words: Biomass gasification, synthesis gas. Biofuels.

В настоящее время ископаемое топливо составляет наибольшую долю в мировом энергоснабжении и может достигнуть более 80% среди различных поставщиков энергии к 2040 году. Такая ситуация будет иметь катастрофические последствия с точки зрения ущерба окружающей среде из-за выбросов парниковых газов (ПГ). Возникает ситуация, при которой желательно заменить ископаемое топливо возобновляемыми источниками энергии [1].

Это может решить проблемы других возобновляемых источников энергии, такие как прерывистость ветра и солнца. Источниками биомассы являются промышленные лесные отходы, такие как щепа, опилки и кора, и сельскохозяйственные отходы, такие как солома, рисовая шелуха и багасса [1].

Основной ресурсной базой для получения биомассы в России являются отходы лесозаготовок, на долю которых приходится 40...60%, а 20% составляют отходы, образующиеся при обработке древесины, и пока используется только 20%. По приблизительным оценкам, общий годовой объем отходов лесопромышленного комплекса составляет более 200 млн.м³. Отходы сельскохозяйственного производства составляют 200...250 млн.м³ в год. Только отходы промышленного лигнина отправляют на свалки 100 млн. м³ в год. Твердых бытовых отходов ежегодно накапливается 35 млн. тонн. В целом, накопленный объем растительных отходов, ежегодно образующихся в России, эквивалентен примерно 100 млн. тонн нефти.

Биомасса кроме того, что может быть использована в качестве альтернативы ископаемому топливу, также будет полезна для производства водорода.

В [1] рассмотрена расчётная схема газификации биомассы с получением водорода (рис.1). Нами была построена и верифицирована аналогичная расчетная модель в Aspen Plus (рис. 2).

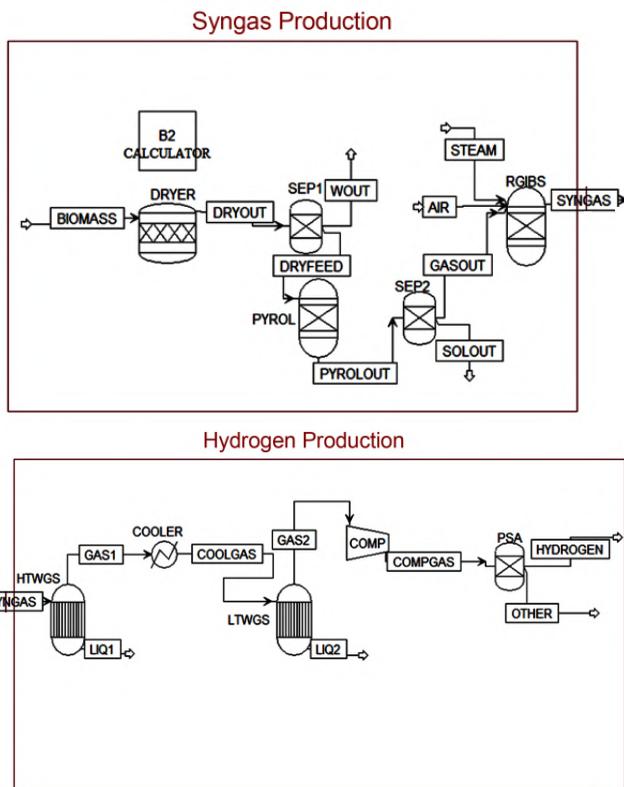


Рис.1 Технологическая схема газификации Aspen Plus, интегрированная с производством водорода

В табл.1 приведены сравнительные характеристики биомассы в рассматриваемой расчетной схеме (рис. 1) [1] и древесных отходов характерных для деревообрабатывающей промышленности кородревесных отходов Архангельского ЦБК (рис. 2) [2].

Таблица 1. Сравнительные характеристики биомассы

	ЦБК [3]	Опилки [1]
Влажность, %	47,2	7
Летучие вещества, %	21,55	81,72
Зольность, %	1,4	1,08
Углерод, %	29,85	17,2

Результаты расчета газификации биомассы для биомассы ЦБК, сильно отличаются от рассмотренных в [1]. Существенным фактором

многим районам России, биомасса в России еще не используется в полной мере.

Литература

1. Sahar Safarian, Runar Unnthorsson, Christiaan Richter Faculty of Industrial Engineering, Mechanical Engineering and Computer Science, University of Iceland, Reykjavik, Iceland. Division of Environmental Systems Analysis, Department of Technology Management and Economics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. Performance Investigation of Biomass Gasification for Syngas and Hydrogen Production Using Aspen Plus. - Open Journal of Modelling and Simulation. Vol.10 No.2, April 2022

2. Алешина А. С., Сергеев В. В. Газификация твердого топлива: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 202 с.

3. Шушпанова Д.В., Андрухов Е.К., Морено Перес Д.А. Российский университет дружбы народов Анализ развития биоэнергетики в России и Колумбии [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2021. – №2.

УДК 661.961

ХАЛИД ЭЛЬ-ШЕЙХ¹ ст. преподаватель,
К.А. ПЛЕШАНОВ¹ к.т.н.,
И.Г. ФИЛИППОВ¹ аспирант
Г.А. РЯБОВ² д.т.н.,

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ

111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

E-mail: FilippovIG@mpei.ru

²ОАО «ВТИ»

115280, Москва, ул. Автозаводская, д.14

Производительность электролизной и плазменной технологий получения водорода

Аннотация. В этом исследовании рассматривались электролизная и плазменная технологии получения водорода, смоделированные в расчетных программах (таких как Aspen Hysys, Aspen Plus и др.), по которым можно провести оценку производительности водорода. Изучается затраты энергии на производство одного и того же количества водорода, а затем выбираются наилучшие условия для получения максимальной производительности водорода. Результаты анализа, показывают, что технология электролиза прочно утвердилась в качестве реализуемой, т.к. имеет наибольшие показатели энергоэффективности, а плазменная технология утвердилась, как перспективный метод производства водорода.

Ключевые слова: Электролиз, плазменный риформинг, водород, биотопливо

KHALID EL-SHEIKH¹ senior Lecturer
K.A. PLESHANOV¹ Ph.D. in Technology Head of Department,
I.G. FILIPPOV¹ postgraduate,
G.A. RYABOV² Doctor of Technical Sciences, Department Head

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
14, Krasnokazarmennaya street, Moscow 111250
E-mail: *FilippovIG@mpei.ru*

²JSC "VTI"
14 Avtozavodskaya str., Moscow, 115280

Performance of electrolysis and plasma technologies for hydrogen production

Abstract. In this study, electrolysis and plasma technologies for hydrogen production were considered, modeled in calculation programs (such as Aspen Hysys, Aspen Plus, etc.), which can be used to evaluate the performance of hydrogen. The energy costs of producing the same amount of hydrogen are studied, and then the best conditions for obtaining maximum hydrogen productivity are selected. The results of the analysis show that the electrolysis technology has firmly established itself as a feasible one, since it has the highest energy efficiency index, and plasma technology has established itself as a promising method of hydrogen production.

Key words: Electrolysis, plasma reforming, hydrogen, biofuels

Водород широко используется в различных секторах экономики. Кроме того, наблюдаемый в последние годы переход к низкоуглеродной энергетике привел к заметному росту исследований возможности преобразования невозобновляемых источников энергии (нефти, природного газа, угля) в водород, обсуждается потенциал водородной энергетике как альтернативной области мировой энергетике. Водород имеет потенциал стать в будущем универсальным, экологически чистым энергоносителем, поскольку при его сгорании образуется только вода, и он не выбрасывает в атмосферу аэрозоли выхлопных газов или загрязняющие воздух вещества, такие как углекислый газ, которые могут усиливать парниковый эффект. Водород все чаще используется в автономных источниках энергии мощностью от 1 кВт до тысяч кВт, включая портативные устройства, аккумуляторы, резервные генераторы, энергосистемы малых электростанций, станки, беспилотники и бытовые теплоэлектрогенераторы. К 2050 году ожидается, что на водород будет приходиться около 18% мирового потребления энергии. По прогнозам, к этому времени потребление водорода возрастет до 370 млн тонн в год, а в 2100 году - до 800 млн тонн. Переход на водородную энергетику позволит сократить выбросы CO₂ на 60% к 2050 году, в то время как спрос на водород может увеличиться в десять раз. Национальные стратегии и программы по созданию и развитию водородной энергетике уже существуют в США, странах ЕС, Великобритании, Японии, Китае, Южной Корее и Австралии. В настоящее время бюджетные ассигнования на

водородные проекты составляют 1,7 млрд долларов США в течение пяти лет в США (при этом в несколько раз больше средств поступает из частного сектора), 2 млрд евро в ЕС и 4 млрд долларов США в течение 20 лет в Японии. Летом 2019 года было принято решение о создании подобной национальной программы в России. [1]

Около половины производимого сегодня водорода производится путем риформинга (преобразования) природного газа (метана и попутных нефтяных газов), 30% - путем риформинга нефти и жидких нефтепродуктов, 18% - путем газификации угля и 4% - путем электролиза воды. Также были разработаны новые методы производства водорода, например, плазменные процессы. Из-за сложности и высокой энергоемкости традиционных процессов конверсии затраты на производство синтез-газа составляют 50-55% от стоимости конечного продукта, а доля капитальных вложений в техническое оборудование достигает 60-65% от общих производственных инвестиций. Помимо высоких капитальных вложений, для производства различных конечных продуктов (водорода, аммиака, метанола и продуктов GTL/Gas-to-Liquid) требуется синтез-газ определенного состава. Конверсия природного газа в сингаз является наиболее сложной и дорогостоящей стадией современного газохимического процесса, а ее низкая эффективность является основным фактором, ограничивающим развитие современной газохимии. Поэтому предпринимаются попытки преодолеть недостатки традиционных процессов конверсии природного газа путем создания альтернативных, принципиально новых, более простых и экономически привлекательных технологий конверсии углеводородного газового сырья в сингаз и водород. [1]

В процессе развития водородной промышленности ожидается, что электролиз воды не утратит свои лидирующие позиции, а вероятнее всего, укрепит их на мировом рынке зеленого водорода. [2]

В компьютерных программных комплексах (таких как Aspen Hysys, Aspen Plus и др.) смоделированы электролизная и плазменная технологии получения водорода, определены особенности работы вышеуказанных процессов и проведено сравнение этих двух способов. Проведен сравнительный анализ характеристик технологий электролиза и плазменного производства водорода.

На сегодняшний день электролиз остается единственным методом, позволяющим получать водород из воды в больших масштабах с эффективностью более 90%. Электролиз воды – это ряд физических и химических процессов, в ходе которых молекула H_2O расщепляется на две молекулы водорода и молекулу кислорода при подаче электрического тока в электролизер. Ток проходит между двумя электродами, разделенными проводящим электролитом. Водород концентрируется на отрицательном катоде, а кислород – на положительном аноде. Поскольку химическая формула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода (H_2O), при электролизе образуется вдвое больше водорода, чем кислорода. Газообразный водород, полученный в резуль-

тате этой серии реакций, может быть использован сразу или сохранен в системе хранения. По сравнению с другими методами получения водорода, этот метод имеет ряд важных преимуществ не только с точки зрения технического совершенства и перспектив улучшения процесса, но и с экологической точки зрения. Чистота производимого водорода может достигать более 99,97%; технический процесс прост по сравнению с конкурирующими решениями, вода доступна и практически неисчерпаема, процесс более гибкий, чем аналогичные технологии, кислород и водород разделяются уже на стадии электролиза, и этот метод значительно упрощает промышленное производство водорода из водных источников. Эффективность этого процесса при производстве коммерческого щелочного водорода и водорода из протонообменной мембраны составляет 62% и 75% соответственно. Для усовершенствования этого процесса в настоящее время ведутся активные исследования возможности сохранения позиций технологии электролиза в производстве водородного топлива. Приоритетной задачей является снижение энергоемкости процесса, что является решающим фактором в формировании стоимости водорода, получаемого электролизом.

Плазменный риформинг и конверсия углеводородных газов, стимулирование химических процессов различными видами разрядов, способных обеспечить сверхравновесные концентрации активных частиц в образующемся объеме плазмы, давно используется во многих химических технологиях. В результате реакции с высокими энергиями активации теперь можно проводить при комнатной температуре и атмосферном давлении без использования катализаторов. Исследователей очень интересует возможность использования плазмохимии для переработки углеводородных газов в сингаз и водород. В случае плазменного риформинга цепочка превращения такая же, как и при обычном риформинге углеводородных газов, но энергия и свободные радикалы для процесса поставляются плазмой, которая генерируется с помощью электричества или тепла. При введении воды или пара в сырьевую смесь помимо электронов образуются радикалы H, OH и O, создавая условия для протекания реакций восстановления и окисления. Привлекательность технологии плазменного риформинга в переработке природного газа и метана обусловлена именно стремлением усовершенствовать традиционные процессы риформинга. Плазменный риформинг можно разделить на две основные категории - термический и нетермический плазменный риформинг. Он осуществляется в плазменных устройствах, называемых плазмотронами, которые генерируют очень высокие температуры (>2000°C) и экономят потребляемую энергию. Выделяемое тепло не зависит от механизма реакции, а оптимальные рабочие условия процесса зависят как от скорости подачи, так и от состава исходного газа. Компактность плазменного риформера обеспечивается высокой плотностью энергии самой плазмы и коротким временем реакции, что приводит к очень короткому времени пребывания

реактивов в риформере. Используемые газовые потоки, обогащенные водородом, могут быть получены из различных видов углеводородного сырья (природный газ, бензин, ракетное топливо, дизельное топливо, нефть, биомасса и т.д.) со степенью конверсии, близкой к 100%. Основными продуктами конверсии являются водород и газообразные углеводороды C1-C4; также были обнаружены жидкие углеводороды, представленные изомеризованными алканами C5-C12. С увеличением концентрации пропана в исходной смеси содержание газообразных олефинов и жидких углеводородов в продуктах реакции увеличивалось, а содержание молекулярного водорода и алканов C2-C4 уменьшалось, что объясняется кинетикой конверсии пропана и его смеси с метаном в плазме. Однако практически непреодолимым недостатком, характерным для большинства плазмохимических методов конверсии природного газа в нужные продукты (за исключением производства ацетилена и сажи в электрической дуге), является их крайне низкая энергоэффективность. [1]

Анализируя имеющиеся данные, можно сделать вывод, что технология электролиза прочно утвердилась в качестве реализуемой, а плазменная технология утвердилась больше, как перспективный метод производства водорода.

Литература

1. Макарян И.А., Седов И.В., Никитин А.В., Арутюнов В.С. Современные подходы к получению водорода из углеводородного сырья / Научный журнал Российского газового общества. Москва, №1(24), 2020
2. Кодряну Н.П., Ишмурзин А.А., Дауди Д.И., Насиров И.Р., Черных С.П. Теоретическая основа и практический анализ технологий для водородной стратегии Российской Федерации «Газовая промышленность». Москва, №1, 2022 г.

УДК 621.928.9

А.А. АБДУЛЛИНА, студент,
В.Э.ЗИНУРОВ, аспирант

Казанский государственный энергетический университет
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
E-mail: azalkaabdullina69826@gmail.com

Очистка дымовых газов от мелких частиц на тепловых электростанциях

Аннотация. Вопрос экологической безопасности Российской Федерации стоит очень остро, так как многие тепловые электрические станции, используя в качестве основного или резервного топлива уголь, торф и др. виды твердого топлива, загрязняют окружающую среду. Во избежание этого предприятия используют золоуловители, но они обладают как рядом плюсов, так и рядом мину-

сов: низкая эффективность, короткий срок службы. Для решения данной проблемы авторами статьи предлагается конструкция мультивихревого сепаратора, которая будет представлять собой насадку на золоуловитель.

Ключевые слова: очистка дымовых газов, тепловые электростанции, золоуловители, мультивихревой сепаратор

A.A. ABDULLINA, student,
V.E. ZINUROV, postgraduate student

Kazan State Power Engineering University
420066, Kazan, Krasnoselskaya str. 51
E-mail: azalkaabdullina69826@gmail.com

Flue gas purification from fine particles at thermal power plants

Annotation. The issue of environmental safety of the Russian Federation is very acute, since many thermal power plants using coal, peat, etc. as the main or backup fuel. types of solid fuels pollute the environment. To avoid this, enterprises use ash collectors, but they have both a number of advantages and a number of disadvantages: low efficiency, short service life. To solve this problem, the authors of the article propose a design of a multi-vortex separator, which will be a nozzle on the ash collector.

Key words: flue gas cleaning, thermal power plants, ash collectors, separator, multi-vortex separator

Вопрос экологической безопасности Российской Федерации стоит очень остро. Так, например, в отраслях энергетики необходимо уменьшение негативного воздействия на окружающую среду, здоровье людей и климат при транспортировке и использовании, рациональное потребление энергоресурсов.

Данная тема является актуальной, так как многие тепловые станции используют в качестве топлива различные горючие вещества: уголь, нефть и прочее – загрязняющие воздушное пространство несгоревшими частицами, вредными и опасными оксидами, а также соединениями тяжелых металлов. Из-за такого негативного влияния на окружающую среду некоторые электростанции были переведены на газообразное и жидкое топливо. Однако такой переход возможен и целесообразен не для всех станций в связи с их местом расположения, ведь газопровод проложен не везде. Уголь как основное топливо используют на Бийской теплоэлектроцентрали, тепловой электростанции ТЭС-1, Троицкой гидроэлектростанции и различных других крупных станциях. Именно поэтому при сжигании твердых видов горючего вещества необходимо использовать эффективные и новые технологии очистки дымовых газов от различных несгоревших частиц [1, 2].

Аппараты, являющиеся наиболее распространенными и улавливающие из дымовых газов твердые частицы, т.е. летучую золу и несгоревшие частицы топлива, - золоуловители. В зависимости от конструк-

тивных особенностей и принципа работы золоуловителя подразделяются на 5 видов: тканевые фильтры, механические сухие, электрофильтры, комбинированные и мокрые. От типа золоуловителя зависит степень очистки (эффективность), а также его принцип действия: эффективность мокрого составляет до 99%, сухого - до 80%.

Однако золоуловители обладают недостатками, во-первых, после определенного периода эксплуатации происходит износ деталей и корпуса. Во-вторых, низкая степень очистки от мелкодисперсных частиц менее 10 мкм в газовых потоках, кроме электрических и мокрых золоуловителей, но размещение и использование таких типов аппаратов возможно не везде ввиду дороговизны, сложности в использовании и определенных критерий к улавливаемому материалу, например, взрывоопасные частицы нельзя улавливать с помощью электрофильтров.

Итак, перед предприятиями, использующие твердые виды топлива, одной из ключевых задач является увеличения эффективности золоуловителей.

Для предотвращения данной проблемы авторами работ предлагается установка сепаратора, используемого в качестве насадки для золоуловителя. Его установка позволит снизить концентрацию частиц в газовых выбросах, увеличить период эксплуатации золоуловителя, а также увеличит эффективность при улавливании мелкодисперсных частиц менее 10 мкм в газовых потоках [3-5].

Конструкция представляет собой 4 ячейки с проделанными в них по 3 отверстия больших и малых размеров круглой формы с каждой стороны, заключенных в квадратный корпус (рис.1).



Рис. 1. Мультивихревой сепаратор (вид спереди)

Принцип работы данного сепаратора очень прост: дымовые газы поступают через большие квадратные отверстия, далее они направляются в отверстия круглой формы, пройдя через которые разделяются на 2 струйки и образуют множество вихрей, в специальных сепарационных каналах. В результате движения этих вихрей образуется цен-

тробежная сила, которая способствует выбиванию твердых частиц из газа, т. к. они отлетают к стенкам и прилипают к ним. Со временем сепаратор нуждается в очистке, т. к. эти частицы скапливаются и под действием силы тяжести падают вниз.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ СП – 3577.2022.1.

Литература

1. Зинуров, В.Э. Оценка времени работы пылеуловителя со скругленными сепарационными элементами / В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, Т.С. Петрова, О.С. Дмитриева // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – № 3. – С. 606-615.
2. Подпоринов Б.Ф., Семиненко А.С. Пути повышения эффективности пылеулавливающих аппаратов в системах очистки вентиляционных выбросов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 104–107. <https://doi.org/10.12737/22434>
3. Биккулов, Р.Я. Оценка эффективности мультивихревого сепаратора при улавливании мелкодисперсных частиц из газовых потоков в системе подготовки воздуха в окрасочных камерах / Р.Я. Биккулов, В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, Т.М. Тахавиев // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26. – № 1. – С. 38-43. – DOI 10.55421/1998-7072_2023_26_1_38.
4. Зинуров, В.Э. Определение расчетной скорости газового потока в фильтрах грубой и тонкой очистки при различной степени загрязненности в окрасочных камерах / В.Э. Зинуров, Р.Я. Биккулов, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, А.Н. Николаев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24. № 5. С. 3-12. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-5-3-12.
5. Зинуров, В.Э. Расчет эффективности улавливания мелкодисперсных частиц сепарационным устройством с каналами квадратного сечения / В.Э. Зинуров, Р.Я. Биккулов, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева // Химическое и нефтегазовое машиностроение – 2022. - № 7. С. 10-13.

СЕКЦИЯ 12.

«МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ»

*Памяти В.Е. МИЗОНОВА
(председатель секции с 1999 по 2021 гг)
ПОСВЯЩАЕТСЯ*

УДК 66.011

С.П. БОБКОВ, д.т.н. профессор,
И.А. АСТРАХАНЦЕВА, д.э.н., зав. кафедрой,
Э.Г. ГАЛИАСКАРОВ, к.х.н., доцент

Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, пр. Шереметевский, 7
E-mail: bsp@isuct.ru

Применение дискретных моделей для исследования базовых процессов переноса

Аннотация. Рассмотрены вопросы использования динамических дискретных моделей для исследования процессов молекулярного переноса тепла или вещества, с учетом неоднородности свойств материала.

Ключевые слова: дискретное моделирование; системы клеточных автоматов; нелинейные задачи переноса.

S.P. BOBKOV, Doctor of Science,
I.A. ASTRAKHANTSEVA, Doctor of Science,
E.G. GALIASKAROV, PhD, docent

Ivanovo State University of Chemistry and Technology
153000, Ivanovo, av. SHeremetevskij 7
E-mail: bsp@isuct.ru

Application of discrete models to research the basic transfer processes

Abstract. The issues of using dynamic discrete models for studying the processes of molecular transfer of heat or matter, taking into account the inhomogeneity of material properties, are considered.

Key words: discrete simulation; cellular automata systems; nonlinear transfer problems.

При обсуждении тематики, заявленной в названии данной статьи, авторы не могут не вспомнить большого ученого и педагога Вадима Евгеньевича Мизонова, плодотворно трудившегося в указанном научном направлении. Тем более, что В.Е. Мизонов долгое время руководил секцией «Математическое моделирование энергетических объек-

тов и систем» журнала «Вестник ИГЭУ» и соответствующей секцией международный конференций «Бенардосовские чтения», и нас связывало с ним многолетнее сотрудничество.

В.Е. Мизонов успешно работал в области моделирования базовых процессов переноса с использованием дискретных стохастических подходов, в частности цепей Маркова [1]. В то же время, хорошо известны классические методы описания процессов переноса вещества и энергии в сплошной среде. Они опираются на фундаментальные уравнения математической физики и позволяют достаточно успешно решать поставленные задачи, что проверено десятилетиями их результативного использования.

Вместе с тем, несмотря на то, что существуют многократно испытанные методы решения указанных уравнений, их широкое использование наталкивается на ряд трудностей.

Во-первых, данные уравнения предназначены для анализа явлений в однородных средах и аналитические решения возможны только для задач с постоянными транспортными коэффициентами. Исследование нелинейных процессов здесь возможно только при использовании численных методов.

Во-вторых, значительные затруднения появляются при постановке краевых условий, если границы исследуемых объектов имеют сложную форму.

И главное. Использование вычислительной техники для моделирования процессов переноса предполагает переход к дискретной форме модели. Резонно указать, что при использовании классического подхода изначально дискретная задача сначала переводится в непрерывную форму, а затем трансформируется обратно в дискретный вид. Не будет ли более справедливо с самого начала использовать не континуальные методы?

Возможно, такими мыслями и руководствовался В.Е. Мизонов, предлагая рассматривать эволюцию технологических и природных систем, как последовательность переходов между отдельными дискретными состояниями. Это и дало ему возможность использовать для исследования математический аппарат теории цепей Маркова.

В то же время, развиваются и другие дискретные подходы к моделированию базовых технологических процессов. Одним из них является применение систем клеточных автоматов [2, 3].

Суть метода заключается в том, что исследуемый объект рассматривается как система взаимодействующих элементов (клеток). При этом размеры элементов принимаются такими, чтобы появилась возможность считать протекающие в них процессы не зависящими от пространственных координат.

В таком случае удобно рассматривать каждую клетку, как абстрактный автомат, который меняет свое состояние по шагам дискретного

времени. Смена состояний инициируется сигналами, которыми клетки-автоматы обмениваются с ближайшими соседями.

В качестве иллюстрации рассмотрим моделирование процесса молекулярного переноса в двухмерной постановке.

Разобьем плоскую пластину на одинаковые клетки размером $h \times h$ (наличие одинаковых клеток и правильность формы не являются обязательным условием). Параметром состояния клетки примем величину концентрации необходимого компонента. Согласно законам диффузии, разность концентраций в соседних клетках вызовет соответствующий поток вещества между ними. Величины этих потоков и будут являться сигналами, которыми обмениваются клетки-автоматы и которые вызывают смену их состояний.

Для указания явного вида уравнений связи между состояниями клеток и входными сигналами (функций переходов автомата) можно использовать одну из форм записи законов сохранения субстанции, в данном случае первый закон Фика для диффузии или закон Фурье для теплопроводности. В дискретном виде для удельных (отнесенных к единице объема) потоков субстанции можно записать:

$$\frac{\Phi_i(t_{k+1}) - \Phi_i(t_k)}{\Delta t} = \frac{a}{h^2} \sum_{j \in O(i)} [\Phi_j(t_k) - \Phi_i(t_k)] \quad (1)$$

где: $\Phi_i(t_k)$ – состояние (значение потенциала) i -й клетки на k -м шаге по времени; $\Phi_i(t_{k+1})$ – то же на $k+1$ -м шаге по времени; $\Phi_j(t_k)$ – состояние соседних клеток на k -м шаге по времени; Δt – интервал квантования времени; a – транспортный (кинетический) коэффициент; h – шаг по пространственным координатам.

Чтобы записать сумму, находящуюся в правой части уравнения (1), следует рассмотреть потоки переносимой субстанции. Если рассматривать взаимодействие только с ближайшими соседями, то можно указать, что от каждой соседней клетки, за один шаг t_k дискретного времени, рассматриваемая получает поток, пропорциональный разности потенциалов этих клеток.

$$\Phi_i(t_{k+1}) = \Phi_i(t_k) + \frac{\Delta t}{h^2} \cdot \sum_j a_j g_{j,i}(t_k) \quad (2)$$

где a_j – коэффициент, учитывающий свойства материала j -й клетки; $g_{j,i}$ – поток субстанции от соседних клеток; j – количество соседних клеток.

Выражение (2) позволяет вычислять новое состояние клетки на каждом шаге дискретного времени.

Можно заметить, что описываемый подход позволяет анализировать процессы в объектах с неоднородными физическими свойствами, поскольку характеристики вещества входят в локальную зависимость (2). Из выражения (2) нетрудно получить выражения, описывающие поведение для клеток, находящиеся на краях рассматриваемой области. Кроме того, если исследуемая область содержит источники или

стоки субстанции, их наличие можно учесть, добавив в уравнение (2) уравнение закона изменения во времени состояния этих особых клеток.

Процедура моделирования состоит из формирования геометрии исходного массива клеток, установления начальных значений переменных состояния и параметров исследуемого процесса и последовательного определения значений элементов массива для различных моментов дискретного времени.

Рассмотрим процесс переноса тепла, вызываемый теплопроводностью – микроскопическим (молекулярным) движением вещества.

Конкретизация физической сущности процесса позволяет указать, что в данном случае переносимой субстанцией будет тепловая энергия. Поэтому, в качестве потенциала переноса здесь следует взять температуру, которая и будет соответствовать состоянию клеток системы. В процессе теплопередачи клетки будут обмениваться тепловыми потоками, поэтому в выражении (1) будет фигурировать разность температур. Транспортным коэффициентом в (1) и (2) будет выступать коэффициент температуропроводности.

Чтобы отойти от тривиальной постановки задачи, разберем задачу, когда в однородной пластине присутствует источник тепла, удельная мощность которого пропорциональна температуре.

Пусть пластина разбита на (41×41) клеток с шагом 1 мм. Коэффициент температуропроводности равнялся $1 \cdot 10^{-6}$ м²/с, коэффициент пропорциональности для удельной мощности источника равнялся 0,025. Начальная температура среды и пластины была принята равной 0 условных градусов. Величина шага моделирование по времени равнялась 0,005 с. При имитации процесса предполагалось, что теплоотдача в окружающую среду отсутствует. Для инициирования процесса центральная точка пластины «поджигалась» мгновенным тепловым импульсом. Результаты расчетов представлены на рис. 1. Время на данном и последующем рисунках проставлено в правом верхнем углу. По горизонтальным осям отложены размеры пластины, по оси аппликата – температура в условных единицах.

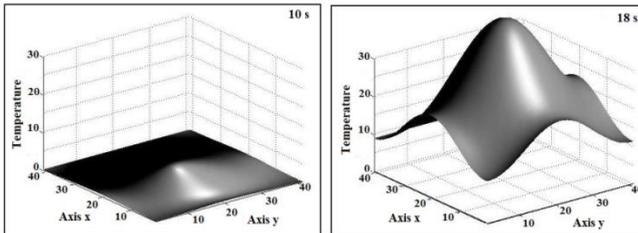


Рис. 1. Результаты исследования квазилинейной модели теплопроводности

Анализ рис. 1 показывает, что на начальном этапе процесса тепло распространяется по пластине, но затем, в области воздействия начального импульса температура резко возрастает.

В качестве второго примера обсудим возможность использования систем клеточных автоматов для моделирования процесса молекулярной диффузии. В первом приближении будем считать, что перенос массы протекает в однофазной системе при постоянной температуре и отсутствии внешних сил.

В данном случае клетки автомата будут обмениваться потоками массы, а в качестве потенциала переноса будет выступать концентрация. Транспортным коэффициентом будет являться коэффициент молекулярной диффузии.

Рассмотрим также нелинейную задачу, когда коэффициент диффузии является функцией координаты.

Модельным объектом была прямоугольная пластина, разбитая на (21×31) клеток с шагом 1 мм. Начальная концентрация вещества в пластине равна 0 условных единиц. Величина шага моделирование по времени соответствовала 0,2 с. Коэффициент диффузии линейно убывал вдоль оси x от $1,0 \cdot 10^{-5}$ до $0,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. На одной из границ пластины был локализован источник массы, который имел начальную концентрацию вещества, равную 1 условной единице. В модели предполагалось, что массообмен с окружающей средой отсутствует. Результаты представлены на рис. 2.

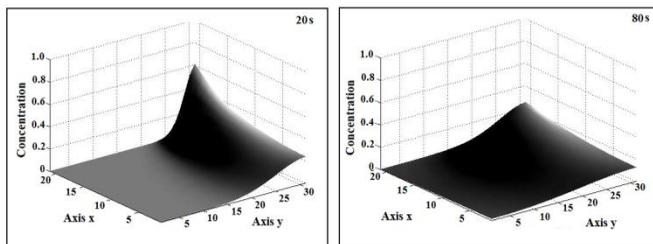


Рис. 2. Результаты исследования нелинейной диффузии

Рис. 2. иллюстрирует неравномерность поля концентраций в пластине, которая более ярко выражена в начальные моменты времени.

В целом, представленные результаты соответствуют принятым представлениям о природе рассмотренных процессов. Также следует отметить, что для имитации, как теплопроводности, так и диффузии использовалась одна и та же программа с минимальными изменениями.

Описанный дискретный подход, использующий модели в виде систем клеточных автоматов представляется физически более ясным по сравнению с применением дифференциальных уравнений с частными

производными, а также более простым в реализации с точки зрения практического использования.

Литература

1. Mizonov V., Berthiaux H., Zhukov V. Application of the theory of markovian chains to simulation and analysis of processes with granular media. ALBI, 2002. 84 p.
2. Бобков С.П. Использование дискретных подходов для моделирования основных процессов химической технологии. // Российский химический журнал. – 2019. т. LXIII, вып. 3-4. С. 22-30.
3. Бобков С.П., Астраханцева И.А., Галиаскаров Э.Г. Применение системного подхода при разработке математических моделей // «Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение». 2021. №1(65). С.66-71.

УДК661.257; 66.011: 620.9

А.С. АНДРЕЕВ¹, к.т.н., доцент,
К.В. АКСЕНЧИК², к.т.н., зав. кафедрой

Череповецкий государственный университет,
162602 г. Череповец, пр. Луначарского, 5
E-mail: asandreev@chsu.ru¹, kvaksenchik@chsu.ru²

К вопросу моделирования циркуляционно-прямоточной системы производства серной кислоты

Аннотация. В работе приведены концептуальные подходы к моделированию производства серной кислоты с позиции совмещения циркуляционной и прямоточной систем в единую энерготехнологическую систему с максимальным энерго- и ресурсосбережением.

Ключевые слова: моделирование, серная кислота, циркуляционно-прямоточная система, энерготехнология, энергосбережение, ресурсосбережение.

A.S. ANDREEV¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
K.V. AKSENCHIK², Candidate of Technical Sciences, Head of the Department

Cherepovets State University,
162602 Cherepovets, Lunacharskogo ave., 5
E-mail: asandreev@chsu.ru¹, kvaksenchik@chsu.ru²

To the question of a circulating-direct-flow system modeling for sulfuric acid production

Abstract. The article presents conceptual approaches to modeling the sulfuric acid production from the perspective of combining circulating and direct-flow systems into a single energy technology system with maximum energy and resource conservation.

Key words: modeling, sulfuric acid, circulation-direct-flow system, energy technology, energy saving, resource saving.

Под моделированием системы производства серной кислоты авторы понимают ее идентификацию в виде математической модели. Разработке математической модели должно предшествовать введение в рассмотрение определяющих принципов, которыми следует руководствоваться при ее систематизации. Для химико-технологических систем основополагающим принципам следует отнести [1-4]:

- принцип декомпозиции;
- принцип рециркуляции;
- принцип энерготехнологичности.

Декомпозиция объекта исследования является основным этапом при его системном построении. Этапу декомпозиции должен предшествовать этап формализации объекта. В качестве максимального обобщения на этапе формализации сернокислотная система представляется единственной функцией, содержание которой - производство серной кислоты. При этом функцию производства кислоты можно реализовать независимо как по прямоточной схеме, так и по циклической схеме. В результате такой декомпозиции выделяется два функциональных элемента, и система представляется двумя структурными элементами, которые рассматриваются как две подсистемы.

Очевидно, что этап декомпозиции служит для более глубокой конкретизации моделируемой системы путем усложнения ее структуры. Вместе с тем, реализация принципа декомпозиции для предметного специалиста остается весьма простой. Так, при установлении внутренней структуры объекта исследования необходимо последовательно разделять его на все меньшие и меньшие подсистемы, каждую из которых можно исследовать и моделировать независимо. При формировании новой системы на основе синтеза подсистем необходимо предполагать, что используемые подсистемы уже проверены на работоспособность. Это утверждение остается руководством и при разработке математической модели системы на основе синтеза математических моделей ее подсистем.

Использование рециркуляции в технологических процессах позволяет проектировать системы с максимальным сбережением энергии и ресурсов, а в идеале, создавать циклические системы с безотходной технологией и с минимальными выбросами в окружающую среду вредных веществ. Поэтому в качестве определяющей функциональной составляющей при моделировании сернокислотной системы должна выступать переработка диоксида серы по циклической схеме. При этом функциональное предназначение прямоточной схемы сводится к функции санитарной установки, выполняющей одновременно дополнительную функцию вывода из циклической системы накапливаемых инертных примесей.

Циклическая и прямоточная системы в отдельности имеют свои достоинства и недостатки [5]. Их объединение в единую технологическую систему делает ее более гибкой в управлении, а разрабатываемая

математическая модель позволяет проводить оптимизацию технологического процесса при управлении.

Производство серной кислоты является системой экзотермического преобразования веществ, сопровождающегося генерированием тепловой энергии, проявляющейся в виде тепловых эффектов реакций. В этой связи сернокислотную систему при ее моделировании принципиально следует рассматривать как систему энерготехнологическую. Поэтому моделирование должно предусматривать максимальное использования в технологическом процессе энергии химических превращений и минимизацию выбросов неиспользованной тепловой энергии в окружающую среду.

Проведенная авторами формализация и декомпозиция моделируемой системы с учетом принципов рециркуляции и энерготехнологичности позволяет выделить следующие функциональные подсистемы (блоки), каждую из которых можно моделировать и исследовать самостоятельно:

- блок получения концентрированного диоксида серы;
- блок перемещения технологических потоков и организации циклов химических превращений;
- блок оптимизации соотношений производительностей системы по циклической и прямоточной схеме;
- блок преобразования тепловой энергии химических превращений в электрическую энергию и холод;
- блок санитарной установки.

Вывод: таким образом, применение основополагающих принципов декомпозиции, рециркуляции и энерготехнологичности позволяет моделировать производства серной кислоты с позиции совместности циркуляционной и прямоточной систем в единую энерготехнологическую систему с максимальным энерго- и ресурсосбережением.

Литература

1. Игин В.В., Долгов Д.В., Грабун Е.М. Перспективные направления развития технологии получения серной кислоты из серы методом ДК-ДА // Труды НИУИФ: к 100-летию основания института. Т.1. Вологда: Древности Севера, 2019. С. 148-154.
2. Игин В.В. Производство серной кислоты в Российской Федерации и перспективные направления его развития // Труды НИУИФ: к 100-летию основания института. Т.1. Вологда: Древности Севера, 2019. С. 155–168.
3. Бесков В.С. Общая химическая технология. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. 452 с.
4. Кутепов А.М., Бондарева Т.И., Беренгартен М.Г. Общая химическая технология. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 528 с.
5. Кузнецов И.М., Харлампиди Х.Э., Иванов В.Г., Чиркунов Э.В. Общая химическая технология. Основные концепции проектирования химико-технологических систем. СПб.: Издательство «Лань», 2014. 384 с.

УДК 621.311.22

А.Н. БЕЛЯКОВ, д.т.н., профессор,
В.П. ЖУКОВ, д.т.н., зав. кафедрой,
П.А. АНТОНОВ, аспирант,
М.Ю. СТЕПИН, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
Email: zhukov-home @yandex.ru

Задача оптимального управления структурой и режимами работы интегрированных интеллектуальных энергетических систем

Аннотация. Обоснована актуальность и представлена постановка задачи оптимального управления структурой и режимами интеллектуальных энергетических систем. Сформулирована целевая функция, намечены пути решения задачи.

Ключевые слова: интеллектуальные энергетические системы, целевая функция, оптимальное управление, структурная и режимная оптимизация.

A.N. BELYAKOV, doctor of Engineering, Professor,
V.P. ZHUKOV, doctor of Engineering, Head of the Department,
P.A. ANTONOV, postgraduate student,
M.Yu. STEPIN, postgraduate student

Ivanovo State Power University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
Email: zhukov-home @yandex.ru

The problem of optimal control of the structure and modes of operation of integrated intelligent energy systems

Abstract. The relevance is substantiated and the formulation of the problem of optimal control of the structure and modes of intelligent energy systems is presented. The objective function is formulated, the ways of solving the problem are outlined

Key words: intelligent energy systems, objective function, optimal control, structural and regime optimization

Обеспечение потребителей тепловой и электрической энергией можно осуществить различными способами, разными энергоносителями и с разной эффективностью. Умные электрические сети по мнению академика РАН В.Е. Фортова[1], позволяют сделать «интеллектуальными» генерацию, передачу и распределение электрической энергии, насытить электрические сети современными средствами диагностики, электронными системами управления. Это дает, по его мнению, кратное уменьшение потерь при передаче электрической энергии от генератора к потребителю, кратное увеличение надежности энергоснабжения, дает возможность оптимально перераспределять энергетические

потоки и тем самым уменьшить пиковые нагрузки, дает возможность потребителю работать в рынке электроэнергии. Следует отметить, что оптимальный режим эксплуатации только электрических сетей позволяет снижать потери на транспорт до 10-15 %. Анализ влияния режима работы только сетевых подогревателей на тепловую экономичность турбоустановки тепловых электрических станций (ТЭС) показывает, что удельный расход топлива при одинаковой выработке тепловой и электрической энергии при эффективной их эксплуатации может быть снижен практически на четверть[2]. Эффект от совместной оптимизации тепловых, электрических и газовых сетей должен существенно превысить эффективность от их отдельной оптимизации. В предлагаемом исследовании делается попытка развить концепцию умных электрических сетей, известную в англоязычной литературе как «Smart Grid» [1], до концепции интеллектуальных интегрированных газовых, тепловых и электрических сетей. Очевидно, что покрытие всех энергетических потребностей возможно за счет или электрической энергии, или природного газа, или комбинацией указанных потоков энергии. Наиболее эффективная комбинация типов энергий и режимов работы энергетической системы может выбираться как на стадии проектирования, так и при эксплуатации энергетических систем. Совместный анализ интегрированных тепловых, электрических и газовых сетей для масштабов энергетических сетей России является, безусловно, актуальной задачей.

Для определения эффективных комбинаций энергетических потоков планируется решение оптимизационной задачи. При формулировке задачи считаем, что тепловая и электрическая энергии и потоки энергии с топливом подаются в систему от n источников, в качестве которых рассматриваются тепловые электрические станции, котельные или газоснабжающие станции. Газовые, тепловые и электрические сети анализируемой структуры обеспечивают подачу газа, тепловой и электрической энергии m промышленным или бытовым потребителям. Поток электрической энергии от i -го источника к j -му потребителю обозначим через N_{ij} , поток тепловой энергии – Q_{ij} , поток газа – B_{ij} . Суммарные нагрузки каждого потребителя (N_j, Q_j, B_j) считаются заданными:

$$\sum_i N_{ij} = N_j, \quad \sum_i Q_{ij} = Q_j, \quad \sum_i B_{ij} = B_j. \quad (1)$$

Удельные затраты электрической (c_{ij}^N) и тепловой (c_{ij}^Q) и первичной энергии топлива (c_{ij}^B) от i -го производителя j -му потребителю определяются суммой себестоимости и затрат на транспорт единицы энергии между указанными элементами системы. Верхний индекс в обозначениях соответствует потокам первичной энергии топлива (B), тепловой (Q) и электрической (N) энергии. В качестве целевой функции оптимизации выбирается сумма затрат на тепловую, электрическую энергии и на первичную энергию топлива, которая обеспечивает заданные нагрузки потребителей. В ходе решения задачи определяются параметры оптимизации, в качестве которых рассматриваются потоки теп-

ловой Q_{ij} и электрической N_{ij} энергии и потока первичной энергии топлива V_{ij} . С учетом (1) и сделанных замечаний задача оптимального управления структурой и режимами работы интегрированных интеллектуальных энергетических систем записывается в виде:

$$F = \sum_{i,j} (c_{ij}^N \cdot N_{ij} + c_{ij}^Q \cdot Q_{ij} + c_{ij}^B \cdot V_{ij}) \rightarrow \min_{N_{ij}, Q_{ij}, B_{ij}} \quad (2)$$

При генерации электрической энергии на ТЭЦ удельный расход тепловой энергии, расходуемый на выработку электрической энергии, существенно зависит от величин тепловой и электрической нагрузок турбоагрегата ($c_{ij}^N = f_i(N_i, Q_i)$) [3], которые определяются суммой заран-

нее неизвестных величин $Q_i = \sum_j Q_{ij}$ и $N_i = \sum_j N_{ij}$. При такой постановке

задача (2) относится к задачам нелинейного программирования [4]. При некоторых допущениях для нелинейной задачи (2) удастся получить ее аналитическое решение методом неопределенных множителей Лагранжа [4].

Литература

1. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SMART GRID. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 207 с.
2. Борисов А.А., Жуков В.П., Ледуховский Г.В., Коротков А.А. Оптимизация многоступенчатых теплофикационных установок // Вестник ИГЭУ. – 2008. – вып. 2. – С. 38-41.
3. РД 34.09.155-93. Методические указания по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций. – М.: СПО ОРГРЭС, 1993.
4. Вильсон А. Энтропийные методы моделирования сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 248 с.

УДК 621.311.22

А.Н. БЕЛЯКОВ, д.т.н., профессор,
В.П. ЖУКОВ, д.т.н., зав. кафедрой,
М.О. ШИРОКОВ, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
Email: ab_pm@mail.ru

Повышение качества распознавания образов с помощью модифицированного вариационного автоэнкодера

Аннотация. В работе представлено применение известной генеративной модели вариационного автоэнкодера в качестве классификатора образов. Предложен ряд модификаций вариационного автоэнкодера, позволяющих суще-

ственно увеличить качество распознавания. Приведены результаты численных экспериментов для базы данных MNIST.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, вариационный автоэнкодер, распознавание образов, классификация изображений.

A.N. BELYAKOV, doctor of Engineering,
V.P. ZHUKOV, doctor of Engineering,
M.O. SHIROKOV, master's degree student

Ivanovo State Power University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
Email: ab-pm@mail.ru

Improving the quality of pattern recognition using a modified variational autoencoder

Abstract. The application of the well-known generative model of a variational autoencoder as an image classifier is presented. A number of modifications of the variational autoencoder are proposed, which significantly increase the quality of recognition. The results of numerical experiments for the MNIST database are presented.

Key words: artificial neural network, variational autoencoder, pattern recognition, image classification.

В настоящее время искусственные нейронные сети (ИНС) широко применяются в различных областях при обработке данных, в том числе при распознавании образов и классификации изображений. ИНС позволяют обобщать информацию и выделять главные признаки в наборе данных, которые существенно влияют на желаемый результат. Однако, существует ряд проблем, связанных, например, с точностью получаемых результатов, интерпретацией внутреннего состояния сетей и др.

Одной из моделей ИНС, позволяющей интерпретировать внутреннее состояние сети, служит вариационный автоэнкодер (VAE – variational autoencoder) [1]. Вариационный автоэнкодер относится к генеративным моделям искусственных нейронных сетей, способных обучаться без учителя на основе метода обратного распространения ошибки.

Целью работы является модификация и применение вариационного автоэнкодера к классификации данных.

Архитектура VAE состоит из двух основных частей – кодер и декодер (рис.1). Кодер сжимает исходные данные в некоторое n -мерное пространство, которое называют скрытым или латентным. Декодер же, в свою очередь, по сжатым данным восстанавливает их в исходное состояние.

Для проведения тестов размерность скрытого пространства принимается равным двум, что позволяет визуализировать на плоскости отображение входных векторов. При этом мы не всегда можем сказать, какие именно признаки входных изображений легли в основу полученного пространства. Мы знаем только, что они представляют собой ли-

нейную комбинацию математического ожидания μ и среднеквадратичного отклонения σ выбранных в процессе обучения автоэнкодером признаков h (рис. 1).

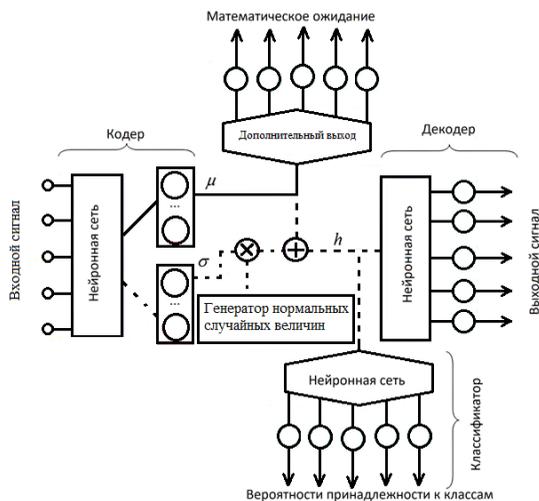


Рис. 1. Архитектура вариационного автоэнкодера. Шестиугольниками показаны новые блоки, пунктирной линией – связи, участвующие только в обучении сети

На рис. 2,а приведен фрагмент скрытого пространства обученного автоэнкодера с отображениями на него входных векторов рукописных цифр базы данных MNIST [1] до модификации.

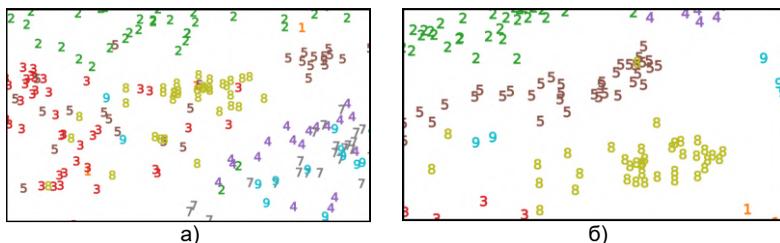


Рис. 2. Фрагмент скрытого пространства обученного вариационного автоэнкодера до модификации (а) и после модификации (б)

По полученным результатам видно, что данные отображаются в свои кластеры, однако кластеры цифр пересекаются. Вероятность попаданий тестовых изображений в свои классы при использовании метода k -средних составляет всего 65.78%.

Для улучшения качества классификации необходимо более четко разделить кластеры, уменьшить их пересечения. Для этого в архитектуру автоэнкодера добавляется еще одна полносвязная нейронная сеть, показанная на рис. 1 шестиугольником. На выходе данной сети формируются вероятности попадания входного сигнала в соответствующий класс. Следовательно, при обучении сети мы помогаем автоэнкодеру целенаправленно формировать кластеры данных в скрытом пространстве. В таком виде предложенная после модификации сеть переводится в тип сети обучения с учителем, что дополнительно требует разметки исходных данных.

Для более четкого разделения данных на этапе классификации образцов уже обученного модифицированного автоэнкодера предлагается строить скрытое пространство не на векторе h , который включает в себя математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение, а только на основе математического ожидания μ (рис. 1). Таким образом, после этапа обучения на основе обучающей выборке строится отображение данных в координатах математических ожиданий сформированных признаков (рис. 2,б), что позволяет существенно увеличить расстояние между кластерами.

В результате тестовых опытов с модифицированным автоэнкодером точность распознавания цифр повысилась до 96,22 %.

Дальнейшее повышение точности распознавания возможно путём увеличения размерности скрытого пространства модифицированного автоэнкодера.

Литература

1. Николенко С.И., Кадурын А.А., Архангельская Е.О. Глубокое обучение. – СПб.: Питер, 2018. – 480 с.

УДК 621.311.22

А.Н. БЕЛЯКОВ, д.т.н., профессор,
М.А. ШИЛОВ, к.т.н., доцент,
Е.В. БАСОВА, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
Email: ab_pm@mail.ru

Ячеечная модель теплопереноса в смазочном слое

Аннотация. В работе представлены результаты моделирования процесса теплопереноса в слое смазки. Модель построена на основе математического аппарата теории цепей Маркова. Показано, что разработанная авторами модель позволяет учитывать нелинейные эффекты процесса теплопереноса в тонком смазочном слое.

Ключевые слова: ячейечная модель, цепь Маркова, теплоперенос, теория смазки.

A.N. BELYAKOV, doctor of Engineering,
M.A. SHILOV, doctor of Engineering,
E.V. BASOVA, postgraduate student

Ivanovo State Power University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
Email: ab-pm@mail.ru

A cell model of heat transfer in the lubricant layer

Abstract. The paper presents the results of modeling the heat transfer process in a lubricant layer. The model is based on the mathematical apparatus of the theory of Markov chains. It is shown that the model developed by the authors allows taking into account the nonlinear effects of the heat transfer process in a thin lubricating layer.

Key words: cell model, Markov chain, heat transfer, lubrication theory

Эффективность многих технологий обработки металлов связана с использованием разнообразных охлаждающих и смазочных жидкостей. Изучение их гидродинамических и тепловых характеристик в конкретных промышленных условиях является одной из актуальных технических и научных проблем.

В работе решается задача описания теплопереноса в смазочном слое с использованием математического аппарата теории цепей Маркова, который показал свою эффективность для решения аналогичных задач [1, 2].

В качестве исследуемого модельного смазочного материала выбран медицинский вазелин со следующими свойствами: теплопроводность $\lambda=0,12$ Вт/(м·°С), удельная теплоемкость $c=2242$ Дж/(кг·°С), плотность $\rho=870$ кг/м³. При проведении расчетов выберем толщину слоя $h=5\cdot 10^{-9}$ м и разобьем слой на m ячеек размера $\Delta x=h/m$. Все параметры исследуемого материала будем считать равномерно распределенными внутри выделенной ячейки. При таком подходе процесс теплопереноса происходит вдоль одной координаты x (рис. 1).

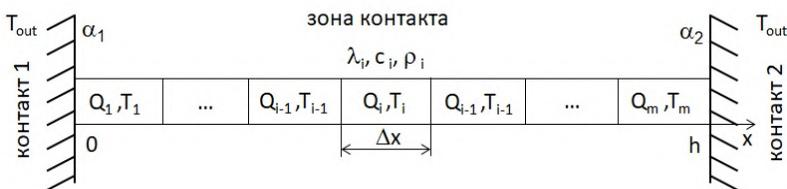


Рис. 1. Расчетная схема теплопереноса в смазочном слое

Состояние системы описывается векторами теплоты Q_i и температуры T_i , связь между которыми при единичной площади поперечного сечения ячеек определяется следующим соотношением

$$Q = T \cdot c \cdot \rho \cdot \Delta x. \quad (1)$$

В процессе механического контакта трущихся элементов происходит выделение тепла за счет трения. За время Δt в каждой ячейке генерируется некоторое количество теплоты ΔQ . Крайние левая и правая ячейки обмениваются теплом через граничные поверхности, имеющие температуру T_{out} . При этом коэффициенты теплоотдачи через эти поверхности обозначаются соответственно α_1 и α_2 . В силу того, что теплоемкость контактов значительно превышает теплоемкость смазочного слоя, считаем температуру контактов постоянной, то есть используем граничные условия первого рода. Процесс теплоотдачи ячеек 1 и m описывается следующими зависимостями

$$\Delta Q_{out1} = \alpha_1 (T_{out} - T_1), \Delta Q_{out2} = \alpha_2 (T_{out} - T_m). \quad (2)$$

Построим для расчетной схемы (рис. 1) согласно [1, 2] цепь Маркова. Эволюция состояния в дискретные промежутки времени k описывается рекуррентной зависимостью

$$Q^{k+1} = P \cdot Q^k + \Delta Q^k, \quad (3)$$

где P – матрица переходных вероятностей, элементы которой показывают вероятность перехода тепловой энергии между ячейками за время Δt . Правила построения матрицы P подробно описаны в [1].

Результаты моделирования процесса теплопереноса в смазочном слое при равномерном распределении источников тепла по ячейкам и начальной температуре 22°C представлены на рис. 2. При проведении расчетного анализа показано, что распределение температуры по ячейкам стабилизируется во времени (рис. 2,а). Максимальное значение температуры (125°C) наблюдается в середине слоя, уменьшаясь к периферии. Примерно через 1000 временных шагов формируется установившийся режим, при котором количество подводимой тепловой энергии от источников становится равным количеству отводимой тепловой энергии от крайних ячеек. Изменение температуры в крайних ячейках представлено на рис. 2,б. Разница установившихся температур обусловлена различными граничными условиями на левой и правой границах, которые обуславливаются разными значениями коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 .

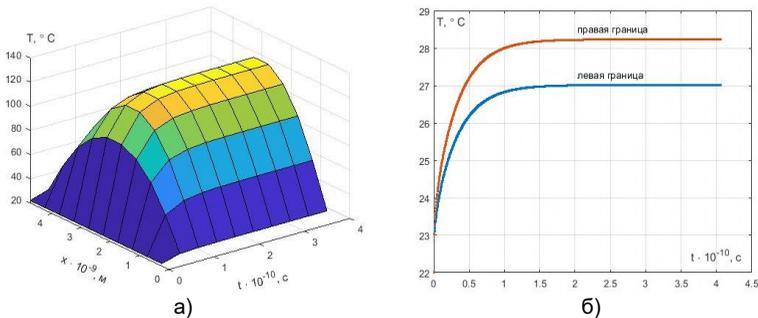


Рис. 2. Результаты моделирования: а) – эволюция изменения температуры в слое смазки; б) – изменение температуры на границах расчетной области

Предложенная модель теплопереноса позволяет не только следить за эволюцией вектора состояния системы, но и учитывать нелинейные эффекты. Например, учитывать известные зависимости коэффициента теплопроводности и теплоемкости смазки от температуры, влияющие на процессы теплопереноса и трения, что в свою очередь влияет на тепловую мощность источников.

Литература

1. Mizonov V., Yelin N. Numerical study of melting a rod by a periodically moving local heat source // Int. J. Therm. Sci. 2015. Vol. 97. P. 1–8. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2015.06.005
2. Mizonov V.E., Mitrofanov A.V., Basova E.A. Theoretical study of heat conduction in multi-layer spherical body with phase transformation in layers // Chem-ChemTech. – 2020. – Vol. 63, No. 7. – P. 54-60. – DOI 10.6060/ivkkt.20206307.6206.

УДК 621.311.22

К.Н. БУБНОВ, аспирант,
В.П. ЖУКОВ, д.т.н., зав. кафедрой,
А.В. ГОЛУБЕВ, к.т.н., зав. кафедрой

Ивановский государственный энергетический университет имени Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
Email: zhukov-home@yandex.ru

Матричное моделирование и диагностика состояния проточной части теплофикационной турбины

Аннотация. Представлена разработка математической модели теплофикационной турбины Т-250/305-23,5-ДБ и метода диагностики технического состояния проточной части.

Ключевые слова: паровая турбина, математическая модель, диагностика, техническое состояние.

K.N. BUBNOV, postgraduate student,
V.P. ZHUKOV, doctor of Engineering,
A.V. GOLUBEV, candidate of technical sciences

Ivanovo State Power University,
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
Email: zhukov-home@yandex.ru

Matrix modeling and diagnostics of the state of the flow path of a cogeneration turbine

Abstract. The development of a mathematical model of the heating turbine T-250/305-23.5-DB and a method for diagnosing the technical condition of the flow path are presented.

Key words: steam turbine, mathematical model, diagnostics, technical condition.

Одной из важных проблем в энергетическом комплексе является высокий износ оборудования, что часто приводит к снижению надежности энергоснабжения и многочисленным авариям на электрических станциях и сетях [1]. Традиционно в течение эксплуатации обслуживающий персонал тепловой электростанции контролирует и поддерживает техническое состояние оборудования путем проведения плановых ремонтов и регламентных проверок [2]. Данные мероприятия часто не позволяют диагностировать зарождение дефектов и спрогнозировать их дальнейшее развитие. В связи с этим разработка системы непрерывного мониторинга и диагностики технического состояния паровой турбины является актуальной задачей.

Объектом исследования данной работы является теплофикационная паровая турбина Т-250/305-23,5-ДБ. Предмет исследования – моделирование и диагностика технического состояния паровой турбины. Целью исследования является разработка математической модели метода диагностики технического состояния проточной части паровой турбины.

Математическая модель турбины Т-250/305-23,5-ДБ, разработанная в соответствии с единой методологией матричной формализации [3], представляет совокупность линейных (балансовые соотношения массы и энергии) и нелинейных (зависимость Стодоль-Флюгеля) уравнений [4]. Решение системы линейных и нелинейных уравнений выполняется методом итераций. Данная модель позволяет по известным значениям эффективной площади проходных сечений отдельных отсеков турбины рассчитать распределение давления по проточной части [4]. Идентификация математической модели турбины Т-250/305-23,5-ДБ выполнена на основании эксплуатационных данных из архива АСУТП вышеуказанной турбины. Результаты идентификации и проверки адекватности модели продемонстрированы совпадением расчетных и экспериментальных данных для временного отрезка $T \in [0; 9]$ ч на рис. 1.

Суть метода диагностики проточной части турбины заключается в решении оптимизационной задачи, целевая функция которой представлена в следующем виде:

$$F(\Phi) = \sum_{j=1}^J [p_j^{рас.} (D_o^{экс.}, P^{то}, \Phi) - p_j^{экс.}]^2 \Rightarrow \min_{\Phi} \quad (1)$$

при ограничениях:

$$D_{o, \min} \leq D_o^{экс.} \leq D_{o, \max}, \quad P_{\min}^{то} \leq P^{то} \leq P_{\max}^{то}, \quad (2)$$

где $\Phi = [\Phi_j]$ – вектор значений эффективной площади проходных сечений отсеков паровой турбины, б/п; $p_j^{рас.}$, $p_j^{экс.}$ – расчетное и экспериментальное значения давления пара на входе в j-ый отсек, кгс/см²; $D_o^{экс.}$ – экспериментальное значение расхода свежего пара на турбину,

кг/с; P^{TO} – давление пара в камере теплофикационного отбора, кгс/см²;

$D_{0,min}$, $D_{0,max}$ – минимальное и максимальное значения расхода свежего пара на турбину, кг/с; P_{min}^{TO} , P_{max}^{TO} – минимальное и максимальное значения давления пара в камере теплофикационного отбора, кгс/см²; индексы: j – номер отсека; J – общее количество отсеков.

Для проверки работоспособности метода диагностики технического состояния проточной части проведен численный эксперимент. В момент времени (9:20) вносится тестовое модельное возмущение, соответствующее абразивному износу двух отсеков цилиндра высокого давления турбины ($\varphi_1=1.08$; $\varphi_2=1.05$), в свою очередь, все оставшиеся отсеки турбины находятся в исправном состоянии ($\varphi_j=1$, ($j=3\div 7$)).

После внесения тестового возмущения в ходе решения оптимизационной задачи (1) были найдены следующие значения компонентов вектора Φ : $\varphi_1=1.0798$; $\varphi_2=1.0514$; $\varphi_3=1.0014$; $\varphi_4=0.9985$; $\varphi_5=0.9942$; $\varphi_6=1.0001$; $\varphi_7=1.0038$. Результаты численного эксперимента, выполненного применительно к турбине Т-250/305-23,5-ДБ, для периода времени с 0:00 по 23:59 представлены на рис.1.

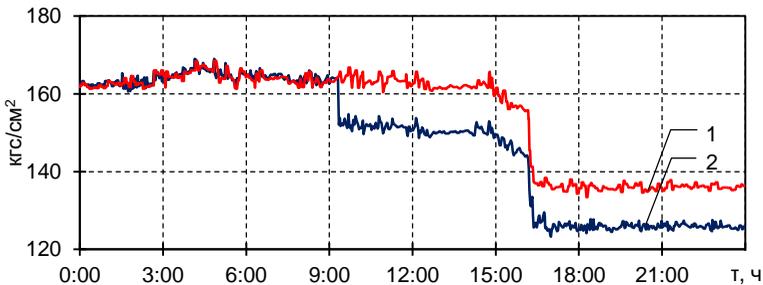


Рис. 1. График изменения давления пара в камере регулирующей ступени турбины при внесении в момент времени (9:20) модельного возмущения:
1 – реальный тренд из архива АСУТП; 2 – математическая модель.

Анализ результатов показал, что предложенный метод диагностики технического состояния проточной части позволяет на всем рассматриваемом промежутке времени определить эффективную площадь проходных сечений отсеков паровой турбины с относительной погрешностью 2.9 %.

Вывод. Разработанная математическая модель турбины Т-250/305-23,5-ДБ, проведенная ее идентификация и предложенный метод диагностики проточной части позволяют по изменению распределения давления определить предполагаемое место дефекта. Таким образом, модель и метод могут быть использованы в качестве модуля при со-

здании программного комплекса предиктивной аналитики энергетического оборудования.

Литература

1. Стратегия ремонтов паровых турбин на основе анализа надежности их узлов / Мурманский Б.Е. и др. // Надежность и безопасность энергетики. – 2014. – № 4(27). – С. 58-63.
2. Технические средства диагностирования: Справочник / Ключев В.В. и др.; Под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
3. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических теплообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
4. Математическая модель расходных характеристик паротурбинных установок / Бубнов К.Н. и др. // Вестник ИГЭУ. – 2022. – № 5. – С. 72-79.
5. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. 239 с.

УДК 004.7.032.26:681.586

С.В. ГУЖОВ, к.т.н.,
М.С. БАШЛЫКОВ, студент

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14, стр.1
E-mail: GuzhovSV@mpei.ru

Применение нейросетевого подхода для прогнозирования показателей энергопотребления

Аннотация. В работе рассмотрены этапы разработки нейросетевого программного обеспечения. Представлены описания используемых для задачи прогнозирования показателей энергопотребления искусственных нейронных сетей.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, прогнозирование, потребление

S.V. GUZHOV, Candidate of Engineering,
M.S. BASHLYKOV, student

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
Krasnokazarmennaya 14, build. 1, Moscow, 111250 Russia
E-mail: GuzhovSV@mpei.ru

Application of neural network-driven approach for energy consumption prediction

Abstract. This paper shows development stages of neural network-based software. Descriptions of artificial neural network models used for problem of energy consumption prediction are provided.

Key words: artificial neural network, prediction, consumption

В энергетической промышленности при проведении мероприятий необходимо минимизировать затраты, учитывая, однако, многие факторы: изменения спроса, погодных, экономических и экологических условий. Разработка модели, учитывающей все взаимодействия, сложна, а использование возобновляемых источников энергии ненадёжно в связи с их зависимостью от погодных условий. Уместно использовать модель, которая может достаточно точно предсказывать изменения в использовании ресурсов. Искусственные нейронные сети (ИНС) становятся полезными в условиях заранее неизвестных отношений между переменными и когда точностью прогнозных значений можно несколько пренебречь ради адаптируемости модели [1].

Применение ИНС ведёт к подходу, основанному на обработке данных. Поэтому работоспособность программного обеспечения зависит от вида данных, которые можно собрать. В случае задачи прогнозирования следует выделить следующие этапы работы с данными.

Сбор данных: обеспечивается путём изучения открытых источников, кооперацией с различными организациями, ручным сбором. Не всегда данные предоставляются в удобном виде, поэтому часто необходима их предварительная обработка.

Обработка данных: часто используется снижение размерности данных – в процессе из данных благодаря интуиции или рекомендациям эксперта извлекаются лишь важные признаки; приведение значений к численному виду, причём полезна нормализация значений для более качественного обучения модели ИНС. Кроме обработки данных также применяется аугментация данных, которая позволяет генерировать новые данные на основе имеющихся.

Выбор обучающего и тестового множеств: так как модель должна быть не только обучена, но и протестирована, накопленный объём данных целесообразно разделить на два отдельных множества. Это разбиение может происходить как автоматически по случайному значению заданного критерия (например, процент от всего числа примеров), так и при помощи эксперта, который может подсказать, на каких данных модель надо обязательно проверить. Требованием для разбиения данных является разнообразие или репрезентативность – если обучающее множество будет содержать недостаточное количество данных о каком-то случае или излишнее об одном случае, нейронная сеть рискует некорректно обучиться работе с ним.

Искусственная нейронная сеть – это математическая модель, которая описывается в биологических терминах. ИНС состоит из множества связанных элементов, называемых нейронами. Каждый нейрон генерирует численный сигнал, который передаётся другим нейронам, а веса связей регулируют вклад отдельных нейронов в итоговый результат. При решении задачи прогнозирования в области энергопотребления выделяют следующие модели:

Многослойный перцептрон (MLP) – одна из классических моделей ИНС, в которой слои соединяются только последовательно. При этом все нейроны соседних слоёв соединяются друг с другом. Модель включает в себя более чем один скрытый слой [2].

Рекуррентные нейронные сети (RNN) (рис. 1) особенны тем, что на вход скрытого слоя подаётся не только значение предыдущего слоя, но и выходные значения нейронов этого или следующих слоёв [3].

LSTM – подтип RNN, который передаёт информацию на большее расстояние, решая проблему потери информации. Здесь используются не просто нейроны, но целые модули, организующие дополнительную обработку значений [3, 4].

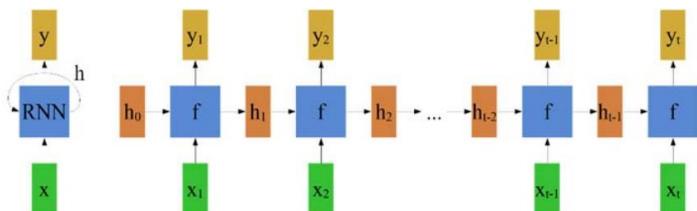


Рис. 1. Схема рекуррентной нейронной сети в свернутом виде (слева) и в развернутом (справа)

GRU – аналогично LSTM такие модели состоят из модулей, однако отличается строением модуля. В моделях GRU из одного модуля в другой передается только один параметр, а не два, как это было у LSTM [4].

Свёрточные нейронные сети (CNN) применяют особые типов слоёв: свёрточных и подвыборки (пулинга) (рис. 2). Свёрточные слои распознают образы, постепенно переходя от низкоуровневых признаков к всё более высокоуровневым. Фактически постепенно происходит снижение числа параметров [5].

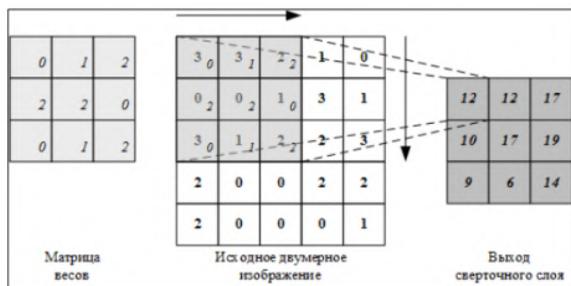


Рис. 2. Свёрточные нейронные сети

Важен также выбор метода обучения нейронной сети: чаще всего используется алгоритм обратного распространения ошибки, однако популярность стал набирать подход, при котором используются эволюционные и гибридные алгоритмы [5].

Литература

1. Babatunde D. E., Anozie A., Omoleye J. Artificial Neural Network and its Applications in the Energy Sector – An Overview // International Journal of Energy Economics and Policy.– 2020.– V.10.– No.2.– P. 250–264.
2. Leite C., F., Costa K., Canas Rodrigues P., Salas R., López-Gonzales J.L. Statistical and Artificial Neural Networks Models for Electricity Consumption Forecasting in the Brazilian Industrial Sector // Energies.– 2022.– V. 15.
3. Yingying X., Zhi L., Yujun L., Haixia H., Yankun C., Yuefeng Z., Wei G., Lizhen C. Feature data processing: Making medical data fit deep neural networks// Future Generation Computer Systems.– 2020.– V.109.– P. 149–157.
4. Mahjoub S., Chrifi-Alaoui L., Marhic B., Delahoche L. Predicting Energy Consumption Using LSTM, Multi-Layer GRU and Drop-GRU Neural Networks// Sensors.– 2022.– V. 22.
5. Liao S., Jimenez G. A new optimal prediction technique for energy demand based on CNN and improved water strider algorithm: a study on socio-economic-climatic parameters// Evolving Systems.–2022.–V.13.–P. 759–775.

УДК 658.264:004.032.26

С.В. ГУЖОВ, к.т.н
Д.В. ТОРОП, студент

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, г. Москва, ул.Красноказарменная, д.14, стр.1
E-mail:GuzhovSV@mpei.ru, ToropDV@mpei.ru

Применение нейросетевого подхода для обоснования необходимой и достаточной степени дискретизации факторов, влияющих на теплотребление района

Аннотация. В работе приведены результаты исследования о влиянии степени дискретизации факторов, влияющих на теплотребление района на точность прогнозирования теплотребления при применении нейросетевого подхода.

Ключевые слова: теплоэнергетика, прогнозирование теплотребления, предсказательная аналитика, искусственные нейронные сети, ИНС, степень дискретизации, факторы.

S.V.GUZHOV,PhD,
D. V. TOROP,student

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
111250, Moscow, st.Krasnokazarmennaya, 14, bld. 1.
E-mail:GuzhovSV@mpei.ru,ToropDV@mpei.ru

The use of a neural network approach to justify the necessary and sufficient degree of discretization of factors affecting the heat consumption of the area

Abstract. This article presents the results of a study on the influence of the discretization degree of factors affecting the heat consumption of the area on the accuracy of forecasting heat consumption when using the neural network approach.

Key words: heat power engineering, heat consumption forecasting, predictive analytics, artificial neural networks, ANN, sampling rate, factors.

Оптимизация энергетических систем и снижение вредных выбросов от источников энергии – наиболее актуальная и важная задача современной теплоэнергетики.

На данный момент, самым перспективным решением проблемы может стать применение нейросетевого программного обеспечения для прогнозирования спроса теплоснабжения района.

В таком случае, качество прогнозирования напрямую зависит от степени дискретизации данных об объекте, факторов, влияющих на прогнозирование, и даже структуры применяемого программного обеспечения.

Температура наружного воздуха и численность населения являются ключевыми факторами потребления энергии [1]. Однако относительная важность климатических и социально-экономических факторов, влияющих на потребление энергии в различных временных масштабах, изучена недостаточно, и самыми используемыми факторами для предиктивного анализа энергопотребления в настоящее время являются климатические факторы. Это обусловлено простотой данных, достаточным объемом и доступностью данной информации для исследований.

Функцию зависимости энергопотребления энергетическим объектом от климатических факторов принимает следующий вид:

$$Q = f(t, \varphi, P, T_{\text{дня}}),$$

где Q – величина энергопотребления, Вт; t – среднее значение температуры наружного воздуха на высоте 2 метра над поверхностью земли за определенный промежуток времени, °С; φ – направление ветра на высоте 10-12 метров над земной поверхностью, осредненное за 10-минутный период непосредственно предшествовавший сроку наблюдения, рад; P – среднее значение атмосферного давления на уровне станции за определенный промежуток времени, мм.рт.ст.; $T_{\text{дня}}$ – продолжительность светового дня, мин.

В результате эксперимента по прогнозированию энергопотребле-

ния района от указанных факторов с разной степенью дискретизации получены следующие графики:

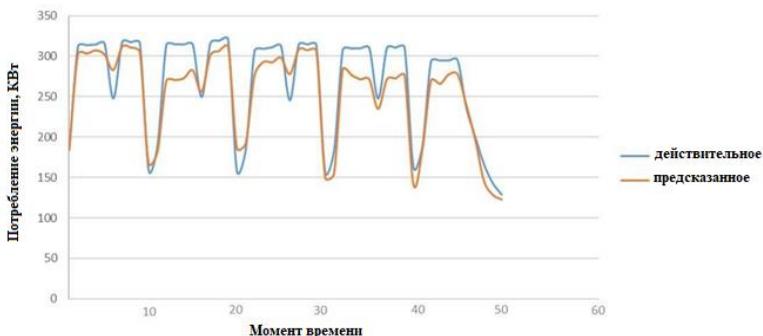


Рис. 1. Сравнение предсказанного объёма энергопотребления с действительным при использовании данных прогноза погоды с дискретизацией среднесуточного значения

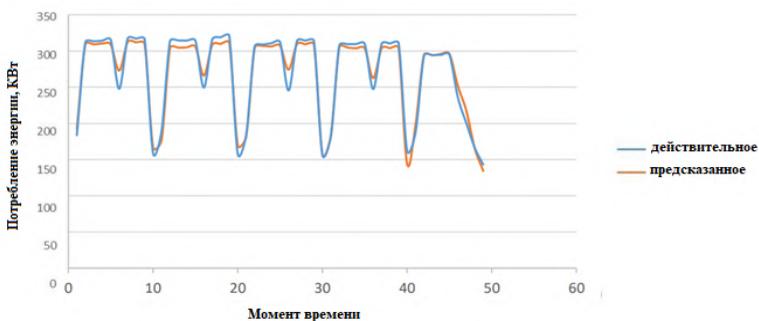


Рис. 2. Сравнение предсказанного объёма энергопотребления с действительным при использовании данных прогноза погоды с дискретизацией среднечасового значения

Учитывая, что точность суточного прогноза погоды в настоящее время достигает 96 %, а среднесрочного уже 78 % [2] при достаточной предварительной очистке и предобработке данных при использовании ежечасного прогноза погоды точность прогноза потребления теплоэнергии районом достигает 95-99%, при использовании среднесуточных данных – 90-98%, а при использовании среднемесячного показателя не более 95%. Очевидно, что дальнейшие исследования надо сконцентрировать на краткосрочных (до 6-ти часов) и среднесрочных (до 3-х дней). Долгосрочный прогноз не целесообразен из-за низкой точности прогноза погоды и отсутствия оперативной необходимости для определения режимов работы источника теплоты.

Вывод: таким образом, при применении нейросетевого подхода для прогнозирования энергопотребления для повышения точности результатов прогноза необходима более высокая степень дискретизации факторов при условии достаточной предобработки данных.

Литература

1. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учебное издание для реализации основных образовательных программ высшего образования по направлению 13.03.01 "Теплоэнергетика и теплотехника" / А.Б. Гаряев, И.В. Яковлев, А.В. Клименко, [и др.], Нац. исслед. ун-т "МЭИ" (НИУ"МЭИ") ; ред. А.В. Клименко . 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Изд-во МЭИ, 2021. – 504 с.

2. Седнин В.А. Краткосрочное планирование тепловой нагрузки районной котельной с применением нейросетевого моделирования / В.А. Седнин, Д.И. Власюк, М.И. Позднякова // Энергоэффективные технологии в строительстве, энергетике и жилищно-коммунальном хозяйстве: Сборник трудов I научно-технической конференции студентов и аспирантов с международным участием, Ульяновск, 01 июня 2021 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2021.

УДК 621.1

В.П. ЖУКОВ д.т.н., зав. кафедрой,
И.А. КОКУЛИН аспирант,
В.Н. ВИНОГРАДОВ к.т.н., доцент

Ивановский Государственный Энергетический Университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, улица Рабфаковская 34
E-mail: ilya.kokulin@gmail.com

Моделирование сепарации влаги в испарительных установках

Аннотация. Разработана матричная модель процесса тепломассообмена в многоступенчатой многопоточной испарительной установке мгновенного вскипания с учетом испарения части воды при ее попадании в область пониженного давления. Найдено установившееся распределение давления по ступеням и производительность каждой ступени испарительной установки.

Ключевые слова: модель, тепломассообмен, испарительная установка, теплообменник.

V.P. ZHUKOV, doctor of Engineering, Head of the Department
I.A. KOKULIN, postgraduate student,
V.N. Vinogradov, Ph.D., Associate Professor

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya street 34
E-mail: ilya.kokulin@gmail.com

Modeling of moisture separation in evaporation plants

Abstract. A matrix model of the heat and mass transfer process in a multi-stage multi-flow instantaneous boiling evaporation plant has been developed, taking into account the evaporation of part of the water when it enters the low-pressure area. The steady-state pressure distribution over the steps and the performance of each stage of the evaporation plant are found.

Key words: model, heat and mass transfer, evaporation plant, heat exchanger.

Одним из направлений реализации энерго- и ресурсосберегающих технологий на ТЭС и АЭС является совершенствование систем термической подготовки добавочной воды. Термические способы получения очищенной воды обладают целым рядом преимуществ [1–3]: позволяют получить обессоленную воду высокого качества; не требуют использования химических реагентов; нечувствительны к качеству исходной воды; позволяют использовать низкопотенциальные теплоносители [4]. Особое место при термической подготовке воды занимают многоступенчатые многопоточные испарительные установки мгновенного вскипания (МИУМВ) Exerger FVE, которые относятся к новому поколению испарителей мгновенного вскипания вертикального типа с возможной блочной компоновкой оборудования [4]. Использование данной установки позволяет получить обессоленную деаэрированную подогретую воду требуемого качества, пригодную для питания энергетических котлов давлением 14 МПа. По сравнению с химическими методами подготовки воды использование в МИУМВ энергии конденсации пара для нагрева и последующего испарения очищаемой воды позволяет практически не использовать химические реагенты, а по сравнению с установками обратного осмоса, существенно экономить средства на регенерацию и замену расходных материалов. Сам метод требует значительно меньшего расхода тепловой энергии, капитальных и эксплуатационных затрат [3].

Предмет исследований – моделирование тепломассообмена в многоступенчатой многопоточной испарительной установке.

Целью исследования является совершенствование процесса тепломассообмена в многоступенчатой испарительной установке на основе анализа результатов ее математического моделирования.

Для решения задачи моделирования тепломассообмена с учетом фазового перехода в теплоносителях используются математические модели, построенные на уравнениях баланса массы и энергии [6, 7]. Для решения полученной в ходе моделирования системы линейных и дифференциальных уравнений применяются численные и аналитические методы [7–9].

В ходе решения системы линейных уравнений определяются температуры охлаждающей воды и пара, а также доли или производительности по пару и дистилляту в каждой ступени. Результаты расчетного анализа для восьмиступенчатой испарительной установки представлены на рис. 1 в виде зависимости температур перегретой и охлаждаю-

щей воды и расхода полученного дистиллята от номера ступени при варьировании расхода охлаждающей воды.

Согласно представленным результатам при уменьшении расхода охлаждающей воды с 502 до 126 т/ч производительность установки по дистилляту существенно снижается с 85 до 14 т/ч. Таким образом разработанный подход и полученные результаты позволяют оценивать количество испаренной влаги и рассчитывать производительность испарительной установки для каждой ступени при варьировании расхода охлаждающей воды, что является важным технологическим показателем и позволяет оценивать работоспособность или проектировать испарительные установки для различных режимов работы.

Для проверки достоверности модели выполнены дополнительные расчетные исследования влияния температуры охлаждающей воды на процесс тепломассообмена в МИУМВ. Расчетный анализ показал, что снижение указанной температуры с 60 до 22°C существенно повышает производительность установки по дистилляту с 28 до 55 т/ч, что хорошо совпадает с опубликованными результатами [3, 4, 5] и подтверждает достоверность предложенной модели.

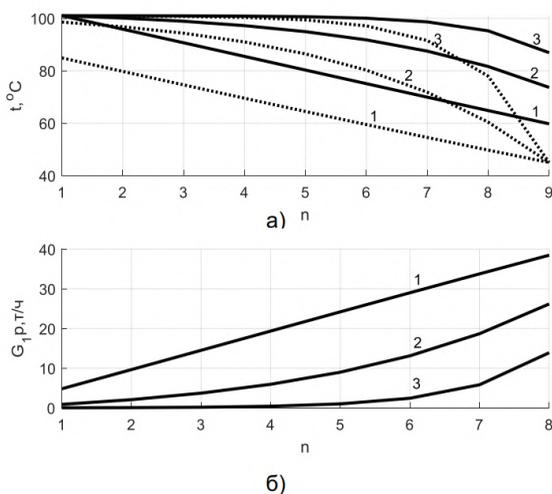


Рис. 1. Зависимость температуры перегретой (сплошная линия) и охлаждающей воды (пунктирная линия) (а) и расхода дистиллята (б) от номера ступени при разных расходах охлаждающей воды: 1 – 502 т/ч; 2 – 251 т/ч; 3 – 126 т/ч

Выводы. Разработанная модель процесса тепломассообмена применительно к многоступенчатым испарительным установкам мгновенного вскипания позволяет формулировать и решать задачи по эффективной организации процессов тепломассообмена в МИУМВ различно-

го назначения, что служит, в свою очередь, основой для постановки и решения задач по выбору оптимальных конструктивных и режимных параметров водоподготовительных установок с МИУ.

Литература

1. Назмиев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1998. –288 с.
- 2.Справочник по теплообменникам: в 2т.Т.1/пер. с англ. под ред. О.Г. Мартыненко и др. М.: Энергоатомиздат, 1987. 560 с.
3. Мошкарин А.В., Мошкарин А.А. Анализ схем испарительных установок тепловых электростанций. – Иваново, 2007. 271 с.
- 4.Термообессоливающая установка Exerger [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://storage.yandexcloud.net/startupvillage20/uploads/2e/f35387f3395c325a3bb9a919809c35.pdf>[датадоступа08.11.2022].
5. Матричная формализация расчета многоступенчатой испарительной установки мгновенного вскипания / В.П. Жуков, А.В. Мошкарин, Е.В. Барочкин и др. // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XI Бенардосовские чтения). – Иваново, 2003.С. 182.
6. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических тепломасообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
7. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология –М.: Дрофа, 2004. – 207 с.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Высш. шк., 1973. – 500 с.
9. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 488 с.

УДК 533.6.011.6

М.И. КОРНИЛОВА, аспирант,
Л.В. ХАХАЛЕВА, к.т.н., доцент,
Ю.А. ХАХАЛЕВ, к.т.н.
А.В. ПЕТРОВ, аспирант

Ульяновский государственный технический университет
432027 Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д.32
E-mail: masha.kornilova.1995@mail.ru, larvall@mail.ru, ulstu-td-ua@mail.ru,
lachik173@mail.ru

Математическое моделирование и численное исследование аэродинамики ветропарка LES-методом

Аннотация. В статье рассматривается математическое моделирование и численное исследование аэродинамики модельного ветропарка с семью ветротурбинами. Применялась модель симуляции большого вихря LES-метод (от англ. LargeEddySimulation). Моделирование выполнено в коммерческом пакете STAR CCM+ AcademicPack. Приводятся результаты моделирования. Результаты удовлетворительно согласуются с данными других исследователей.

Ключевые слова: ветропарк, аэродинамический след, LES-модель, турбулентность, дефицит скорости

M.I. KORNILOVA, graduate student,
L.V. KHAKHALEVA, PH.D., ASSOCIATE Professor,
Yu.A. KHAKHALEV, Ph.D.
A.V. PETROV, graduate student

Ulyanovsk State Technical University
432027 Russia, Ulyanovsk, st. Northern Crown, 32
E- mail: *masha.kornilova.1995@mail.ru, larvall@mail.ru, ulstu-td-ua@mail.ru, lachik173@mail.ru*

Mathematical modeling and numerical investigation of wind farm aerodynamics by LES-method

Abstract. The article deals with mathematical modeling and numerical study of the aerodynamics of a model wind farm with seven wind turbines. The large eddy simulation model LES-method was used. The simulation was performed using the commercial STAR CCM+ Academic Pack. The simulation results are presented. The results agree satisfactorily with the data of other researchers.

Key words: wind park, aerodynamic wake, LES-model, turbulence, velocity deficit

Моделирование аэродинамики на основе LES подхода позволяет проводить математическое моделирование определенных вихрей с помощью отфильтрованных уравнений Навье-Стокса. На территории ветропарка эти вихри будут представлять собой турбулентные структуры, которые сопоставимы с диаметром турбины или превышают его и отвечают за перенос массы, импульса и энергии[1].

Завихрения турбулентного потока можно разделить на три режима:

1. Крупные вихри, содержащие энергию. На них не влияет молекулярная вязкость, они несут большую часть энергии потока.

2. Вихри промежуточных инерционных масштабов, на которые не влияют вязкость, граничные условия и большие масштабы.

3. Вихри маленьких масштабов – Колмогорова масштаб (или диссипативные/мелкие), на которые сильно влияет молекулярная вязкость.

LES-подход решает задачи первых двух масштабов. Вихри маленьких масштабов моделируют с помощью подсеточных моделей [2, 3]. Широкое распространение нашли модели, основанные на использовании турбулентной вязкости для параметризации энергетических переходов от крупных вихрей к мелким, среди которых наиболее популярна модель Смагоринского. Модель Смагоринского просто реализуется, хорошо аппроксимирует сток энергии в области подсеточных масштабов и позволяет давать качественные данные об аэродинамике ветропарков [4]. Однако модель Смагоринского является чисто диссипативной и не допускает обратного рассеяния энергии от мелких масштабов к разрешенным. Данный недостаток особо существенен при моделировании пристеночных турбулентных потоков, турбулентных струй и других течений с большими градиентами средней скорости [5]. В литерату-

ре встречается большое количество модификаций модели Смагоринского [6].

С использованием модели LES проведено численное исследование аэродинамики ветропарка с семью ветротурбинами в пакете STAR CCM+ AcademicPack. На рис. 1 показана расчетная область в масштабе 1:100. Диаметр колеса турбины равен 120 м, размеры расчетной области составляют 3х4 км. Количество расчетных узлов составило 3 млн.



Рис. 1. Расчетная область с построенной сеткой

Начальные условия задавались профилями скорости на входе по степенному закону для летнего сезона. Количество оборотов задано 10 об/мин для каждой ветротурбины. Шаг по времени 0,01с.

Контуры усредненной по времени интенсивности турбулентности в горизонтальной плоскости x -у на высоте втулки турбины показаны на рис. 2.

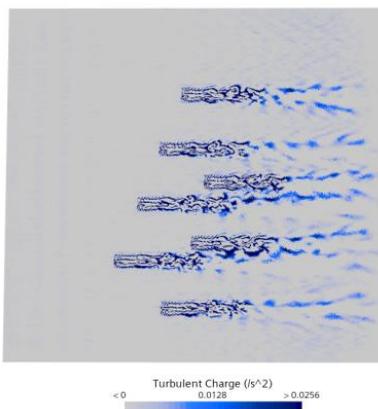


Рис. 2. Турбулентные следы за ветротурбинами

Полученные результаты демонстрируют завихренную структуру следов за ветротурбинами и повышение уровня турбулентности с постепенным восстановлением на удалении 8-10 калибров, что соответствует известным экспериментальным и численным результатам других исследователей [1-4].

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-19-00030, <https://rscf.ru/project/22-19-00030/>

Литература

1. Vermeer L.J., Sorensen J.N., Crespo A. Wind turbine wake aerodynamics // Progress in Aerospace Sciences 2003, №39. pp. 467–510.
2. Wu Y.T., Porté-Agel F. Large-Eddy Simulation of Wind-Turbine Wakes: Evaluation of Turbine Parametrisations // Boundary-Layer Meteorology 2011. 138(3). pp. 345-366.
3. Mehta D, Zuijlen A.H., Koren B., Holierhoek J.G., Bijl H. Large Eddy Simulation of wind farm aerodynamics: A review // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2014, № 133, pp. 1-17.
4. Sorensen J.N., Shen W.Z. Numerical Modeling of Wind Turbine Wakes // Journal of Fluids Engineering. №124, 2002, pp. 393–399.
5. Старченко Р.В., Нутерман Р.Б., Данилкин Е.А. Численное моделирование турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2015. – 252 с.
6. Sagaut P., Yu-Tai L. Large eddy simulation for incompressible flows: An Introduction. Scientific Computation Series // Applied Mechanics Reviews. № 55(6); Springer. 2002. 426 p.

УДК 547.68

Н.С. ШПЕЙНОВА¹, аспирант,
А.В. МИТРОФАНОВ², д.т.н., профессор,
С.В. ВАСИЛЕВИЧ³, к.т.н., доцент

¹Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34, Россия
E-mail: shpejnova@mail.ru

²Торайгыров университет
140008, г. Павлодар, ул. Ломова 64, Казахстан
E-mail: and2mit@mail.ru

³Белорусская государственная академия авиации,
220096, г. Минск, ул. Уборевича, 77, Республика Беларусь
E-mail: svasilevich@yandex.ru

Математическая модель уноса частиц из псевдооживленного слоя

Аннотация. В работе предложена математическая модель функционирования аппарата с псевдооживленным слоем, предполагающая унос некоторой части твердой фазы со свободной его поверхности. Основой расчетной схемы модели является цепь Маркова с дискретным пространством и временем.

Ключевые слова: псевдооживленный слой, унос, цепь Маркова.

N.S. SHPEYNOVA¹, graduate student,
A.V. MITROFANOV², Dr. Eng., professor,
S.V. VASILEVICH³, PhD, head of the lab.

¹Ivanovo State Power University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St. 34, Russia
E-mail: shpejnova@mail.ru

²Toraighyrov University
140008 Pavlodar, Lomova St. 64, Kazakhstan
E-mail: and2mit@mail.ru

³Belorussian State Academy of Aviation,
220096 Minsk, Uborevich St. 77, Belarus
E-mail: svasilevich@yandex.ru

Mathematical model of particle entrainment from a fluidized bed

Abstract. The paper proposes a mathematical model of the working of the apparatus with a fluidized bed, assuming the entrainment of some part of the solid phase from its free surface. The basis of the design scheme of the model is a Markov chain with discrete space and time.

Key words: fluidized bed, entrainment, Markov chain.

Принцип псевдооживления зернистой среды оживающим агентом и аппаратура, использующая этот принцип, проникли в энергетическую отрасль тогда, когда в химической отрасли уже был накоплен некоторый опыт. Во многом этот опыт был связан с образованием некоторых претензий к классическим схемам псевдооживления. С учетом этого вектор развития техники псевдооживления в энергетической сфере изначально был направлен в сторону форсирования гидродинамических режимов, при которых унос материала является неизбежным. В связи с этим возникает необходимость в разработке надежных моделей этого нежелательного процесса [1-2].

Расчетная схема модели предполагает, что пространство аппарата разбивается по высоте на счетное число n ячеек идеального смещения, организованных в цепь. Свойства цепи описывают векторы состояния \mathbf{S} (по одному на каждую фазу), а эволюция каждого из векторов описывается переходной матрицей \mathbf{P} . Эволюция векторов состояния фиксируется в дискретные моменты времени $t_k=(k-1)\Delta t$, где Δt – длительность шага по времени, k – число расчетных шагов [3-4].

$$\mathbf{S}_p^{k+1}=\mathbf{P}_p^k\mathbf{S}_p^k, \quad (1)$$

где \mathbf{P}_p – трехдиагональная матрица вероятностей переходов для твердой фазы, элементы которой вычисляются следующим образом [3-4]:

$$P_{p,i-1,i}^k=d+v_i^k(1-e), \text{ при } 1\leq i\leq n, \quad (2)$$

$$P_{p,i+1,i}^k=d+v_i^k e, \text{ при } 1\leq i\leq n, \quad (3)$$

вероятность остаться в i -й ячейке

$$P_{p,i,i^k} = 1 - P_{p,i+1,i^k} - P_{p,i,i+1^k}, \text{ при } 1 \leq i \leq n, \quad (4)$$

где d – симметричная компонента вероятности переноса частиц из ячейки, v_i^k – несимметричная компонента вероятности переноса из ячейки, e – дополнительный параметр модели, определяющий направление несимметричного переноса ($e=1$ при $v_i^k > 0$ и $e=0$ при $v_i^k < 0$).

Симметричная компонента вероятности переноса определяется как [3-4]:

$$d = D \cdot \Delta t / \Delta x^2, \quad (5)$$

где D – коэффициент макродиффузии [3-4].

Несимметричная компонента вероятности переноса определяется как [3-4]:

$$v_i^k = (W_i^k - V_{sj}^k) \Delta t / \Delta x^2, \quad (6)$$

где V_s – скорость витания одиночной частицы [3-4].

Детальное описание предложенной модели и процедур идентификации ее параметров содержится в работах [3-4]. Здесь, однако, необходимо отметить, что, ее расчетная схема обычно распространяется только на ячейки, занятые материалом, поэтому вероятности диффузионного (симметричного) переноса вводятся не для всех ячеек цепи. В контексте данной работы этого не сделано, поэтому частицы могут забрасываться и в ячейки, расположенные над фиксируемой (определяемой несимметричной компонентой вероятности v) высотой слоя.

Таким образом, ненулевая концентрация фиксируется в любой ячейке цепи. Последняя ячейка цепи на программном уровне все время обнуляется (за счет чего суммарный объем материала в цепи уменьшается), то есть последовательно выполняются следующие операции:

$$S_{p,n}^k = S_{out}^k, \quad (7)$$

$$S_{p,n}^k = 0. \quad (8)$$

На рис. 1 показана расчетная схема модели (а) и эволюция скорости уноса материала из слоя со временем (б).

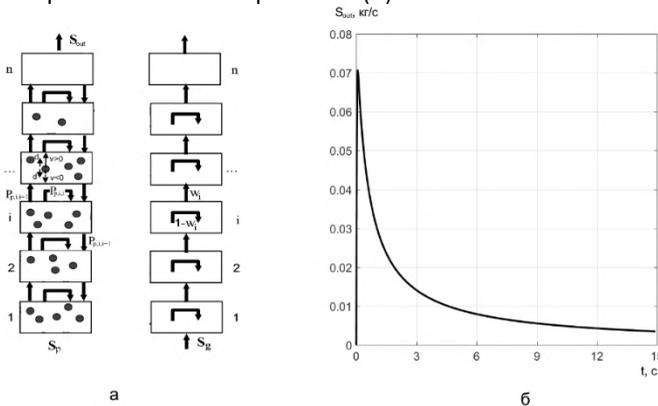


Рис. 1. а – расчетная схема модели; б – интенсивность уноса материала со временем

Предложенный подход к численному моделированию явления уноса частиц из псевдооживленного слоя позволяет получать качественно непротиворечивый результат, что позволяет рассматривать предложенную модель как основу для дальнейшей разработки компьютерного метода расчета уноса частиц из аппаратуры с псевдооживленным слоем.

Литература

1. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник/ Под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.
2. Oka S.N. Fluidized Bed Combustion. NY, Basel, Marcel Dekker, 2004. 599 p.
3. Митрофанов А.В., Мизонов В.Е., Tannous K. Математическая модель эволюции состояния псевдооживленного слоя при влагопереносе. Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2015. Т. 58. № 4. С. 75-78.
4. Митрофанов А.В., Мизонов В.Е., Шпейнова Н.С., Василевич С.В., Касаткина Н.К. Опытнo-теоретическое исследование аксиального распределения частиц твердой фазы в кипящем слое// Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ.– 2021.– Вып.64(4).– С. 349-362.

УДК 536.24

А.Э. НИ, к. ф.-м. н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Томск, ул. Ленина, 30
E-mail: nee_alexander@mail.ru

Гибридный метод решеточных уравнений Больцмана в задачах трехмерной конвекции с учетом массообмена

Аннотация. Сформулирована и верифицирована гибридная математическая модель для анализа процесса тепломассопереноса в трехмерной постановке. Численные исследования проведены при варьировании числа Рэлея, отношения сил плавучести и числа Льюиса при постоянном значении числа Прандтля.

Ключевые слова: метод решеточных уравнений Больцмана, метод конечных разностей; конвективная диффузия

А.Е. NEE, PhD

Tomsk Polytechnic University,
Lenina av. 30, 634050, Tomsk
E-mail: nee_alexander@mail.ru

Hybrid lattice boltzmann method for three-dimensional double-diffusive natural convection

Abstract. A hybrid mathematical model for heat and mass transfer analysis has been built and validated under a three-dimensional formulation. Numerical studies were carried out when varying the Rayleigh number, the ratio of buoyancy forces and the Lewis number under a constant value of the Prandtl number.

Key words: lattice Boltzmann method; finite difference method; double-diffusive convection

Исследования закономерностей конвективных течений, движущей силой в которых одновременно являются температурные и концентрационные градиенты, играют важную роль в науке и технике. Такие течения встречаются в металлургии, океанографии, астрофизике и т.д. Следует выделить, что теоретический анализ, основанный на методах математической физики, является основным инструментом исследования процесса, поскольку физический эксперимент требует значительных материальных затрат.

В настоящее время активно развивается альтернативный подход к моделированию газовой динамики [1–3], в котором поведение потока сплошной среды описывается кинетическим уравнением Больцмана (LBM). При проведении аналитического обзора литературных источников установлено, что исследование тепломассопереноса методом LBM в существенно большей мере выполняются с применением тепловой модели пассивного скаляра. При этом мало внимания уделяется гибриднему подходу, в котором газовая динамика описывается с использованием мезоскопических решеточных уравнений Больцмана, а термомассодинамика – путем конечно-разностного решения макроскопических уравнений энергии и диффузии. Целью настоящей работы является построение гибридной модели решеточных уравнений Больцмана для анализа процесса пространственного тепломассопереноса.

Рассматривается замкнутая кубическая полость (рис. 1), заполненная вязким несжимаемым теплопроводным газом, подчиняющимся законам механики Ньютона. Считается, что источники тепломассовых деления расположены на противоположных вертикальных стенках.

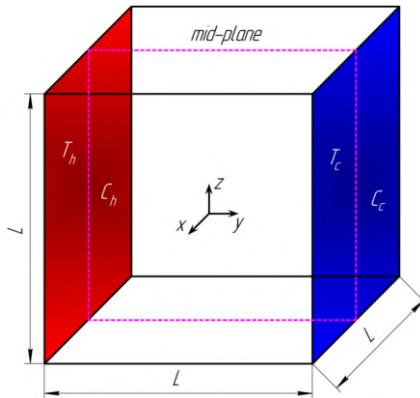


Рис. 1. Область решения

Пренебрегая зависимостью теплофизических свойств от температуры и вязкой диссипацией энергии, гидродинамические, термодинамические и диффузионные процессы описываются, соответственно, следующими уравнениями:

$$f_k(x + c_k \Delta t, t + \Delta t) = f_k(x, t) + \omega \times [f_k^{eq}(x, t) - f_k(x, t)] + F_k, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right). \quad (3)$$

где f – функция распределения условных частиц, T – температура, C – концентрация.

В общем случае алгоритм решения мезоскопических решеточных уравнений Больцмана состоит из таких этапов как столкновение и продвижение условных частиц согласно уравнение (1). С другой стороны, дифференциальные уравнения в частных производных (2) и (3) дискретизировались неявными конечно-разностными схемами первого и второго порядков точности.

На рис. 2 приведены распределения средних чисел Нуссельта и Шервуда.

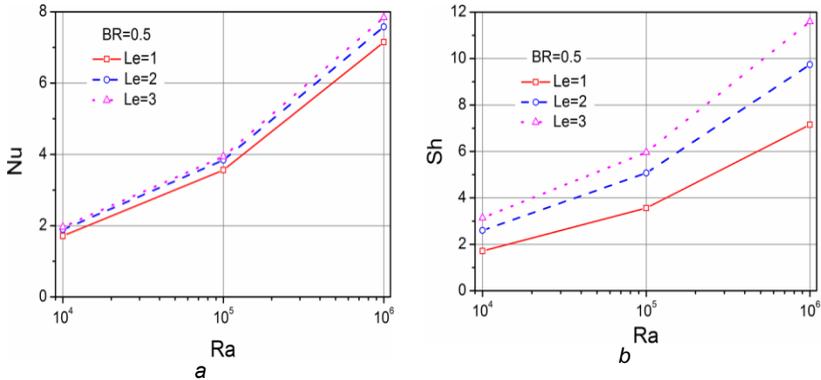


Рис. 2. Зависимости средних чисел Нуссельта (а) и Шервуда (б) от числа Рэлея

Как и можно было предположить, повышение числа Рэлея приводит к усилению процесса переноса теплоты и массы. При этом интересно отметить, что варьирование числа Льюиса приводит к незначительному росту числа Нуссельта. С другой стороны, наблюдается существенная интенсификация процесса массоотдачи.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00011.

Литература

1. Arun S., Satheesh A., Chamkha A. J. Numerical Analysis of Double-Diffusive Natural Convection in Shallow and Deep Open-Ended Cavities Using Lattice Boltzmann Method // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2020. – V. 45. – P. 861–876.
2. Hammouda S., Amami B., Dhahri H. Viscous dissipation effects on heat transfer for nanofluid flow over a backward-facing step through porous medium using lattice boltzmann method // Journal of Nanofluids. – 2018. – V. 7. – P. 668–682.
3. Sharma K. V., Straka R., Tavares F. W. Current status of Lattice Boltzmann Methods applied to aerodynamic, aeroacoustic, and thermal flows // Progress in Aerospace Sciences. – 2020. – V. 115. – 100616.

УДК 66.011

А.В. ОГУРЦОВ, к.т.н., доцент,
К.А. ЛЁТИН, студент,
А.С. ШМЕЛЁВ, соискатель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: ogurtsovav@mail.ru

Математическое моделирование прогнозирования и контроля результатов обучения с помощью теории цепей Маркова

Аннотация. Рассматривается моделирование процесса обучения и контроля. Модель построена на основе теории цепей Маркова. Целевой функцией является прогнозирование числа обучаемых по группам успеваемости.

Ключевые слова: обучение, контроль, цепь Маркова, вектор состояния, матрица обучения, вероятность выхода.

A.V. OGURTSOV, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
K.A. LYOTIN, student
A.S. SHMELEV, graduate student

Ivanovo State Power University
Rabfakovskaya 34, 153003 Ivanovo
e-mail: ogurtsovav@mail.ru

Mathematical modeling of forecasting and control of learning outcomes by means of the theory of Markov chains

Abstract. Modeling of the learning and control process is considered. The model is based on the theory of Markov chains. The objective function is to predict the number of trainees by performance groups.

Key words: labyrinth, configuration, Markov chain, state vector, matrix of transition probabilities, probability of exit.

В педагогике остро стоит вопрос, касающийся одной из важнейших составляющих процесса обучения – контроля и оценивания его результатов. Уже на начальной стадии изучения вопроса оценивания появляется проблема неоднозначности понятия термина «контроль». В современной педагогике данное понятие до сих пор не имеет конкретной однозначной формулировки. С одной стороны, контроль понимают как внешнюю структурную организацию процесса обучения, с другой – как часть процесса обучения [1].

Современные перспективы общественного развития выдвигают новые требования к выпускнику высшей школы – это не только будущий профессионал, обладающий определенным набором знаний, умений и навыков, но еще и человек с багажом личных качеств, таких как: системное мышление, правовая, экономическая, информационная культура, навыки предпринимательства, способность к осознанному анализу своей деятельности, принятием самостоятельных решений в условиях неопределенности, творческая активность и ответственность за выполняемую работу, конструктивность, мобильность, способность к сотрудничеству. То есть это не просто будущий высококлассный специалист, а всесторонне развитая личность, способная к широкой социализации в обществе.

Новые требования к выпускникам часто идут в разрез с действующей системой контроля обучения. Содержание образовательного процесса и методы работы преподавателя меняются, а способы и критерии контроля, оценки результатов остаются неизменными. Следующая проблема: существующая на данный момент система контроля успеваемости во многих случаях является чисто формальной. Это не инструмент объективной диагностики, а всего лишь средство накопления оценок, по которым и определяют качество работы и преподавателя, и обучаемых.

Следовательно, контроль знаний, умений и навыков должен быть на таком уровне, чтобы на основе его результатов можно было предупредить становление ошибочных заключений, обобщить выводы о методах обучения, определить степень освоения изученного материала учащимися, дать оценку их работе, изменить приёмы обучения, скорректировать задания ученикам, имеющим пробелы.

Для описания трансформации знаний при обучении используется матричная модель обучения [2], которая по известному вектору знаний до обучения позволяет рассчитать вектор знаний после него.

Если выделить группы студентов, получающие по итогу тестирования оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «неудовлетворительно», то можно составить матрицу-столбец, называемую «вектор знаний»:

$$f = \begin{pmatrix} 0,3 \\ 0,4 \\ 0,2 \\ 0,1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

В этом случае численное значение элементов матрицы f_i для группы студентов показывает долю студентов, относящихся к i -му классу знаний. При обучении объем знаний и навыков студентов увеличивается, число решаемых ими задач растет, тогда изменяются значения элементов вектора знаний. Матричное уравнение обучения имеет вид

$$f'' = B \cdot f', \quad (2)$$

где f'', f' – распределение студентов по знаниям (вектор знаний) до и после обучения соответственно; B – матрица обучения размера $m \times m$; m – число классов знаний.

Значение элемента матрицы обучения b_{ij} показывает долю студентов, которые, находясь до обучения в j -м классе знаний, после обучения перешли в i -й класс. Матрица B в данном случае аналогична матрице переходных вероятностей в модели, построенной на основе теории цепей Маркова.

Условие нормировки для матрицы обучения имеет вид

$$\sum_{i=1}^m b_{ij} = 1. \quad (3)$$

При повторном обучении (повторении материала на практических занятиях, лабораторных работах или самостоятельно) знания студентов тоже будут изменяться. Из предположения, что каждая операция повторного обучения характеризуется одной и той же матрицей B , вектор знаний после k повторений может быть найден следующим образом:

$$f'' = B^k \cdot f'. \quad (4)$$

Если каждая операция повторного обучения характеризуется своей матрицей B_1, B_2, \dots, B_k , то вектор знаний после k повторений определяется выражением

$$f'' = B_k \cdot \dots \cdot B_k \cdot B_k \cdot f'. \quad (5)$$

Для описания процесса контроля знаний пользуются вероятностной характеристикой – диагональной матрицей контроля C , значения элементов которой C_{ij} показывают вероятность прохождения контроля с положительной оценкой студентами i -го класса знаний. Очевидно, что для студентов с разными знаниями (из разных классов знаний) эти вероятности будут различаться. Вектор знаний студентов после контроля может быть определен через произведение матрицы контроля на входной вектор знаний:

$$\begin{aligned} f_1 &= (I - C) \cdot f', \\ f_2 &= C \cdot f', \end{aligned} \quad (6)$$

где f_1, f_2 – векторы знаний для студентов, не прошедших и прошедших контроль соответственно; I – единичная матрица; f' – исходное распределение студентов по знаниям до контроля; C – матрица контроля.

Предложенная модель позволят прогнозировать результаты контроля обучения.

Литература

1. Образцов П.И. Психолого-педагогические аспекты разработки и применения в вузе информационных технологий обучения. – Орел, 2000. – 145 с.
2. Жуков В.П., Беляков А.Н., Барочкин А.Е. Матричное моделирование технологических систем. – Иваново, 2020. – 88 с.

УДК 621.165

М.Д. ФОМИЧЕВ, аспирант,
В.П. ЖУКОВ, д.т.н., зав. кафедрой

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003, г. Иваново, Рабфakovская 34
e-mail: zhukov-home@yandex.ru,

Расчетный анализ влияния неравномерности распределения теплоносителей по сечению градирни на температуру охлажденной воды

Аннотация. В работе приведены результаты расчетного анализа градирни как контактного многопоточного теплообменного аппарата с учетом неравномерной подачи охлаждаемой воды и охлаждающего воздуха по поперечному сечению градирни, показано влияние указанной неравномерности на эффективность охлаждения циркуляционной воды.

Ключевые слова: многопоточный теплообмен, неравномерное распределение, эффективность теплообмена.

M.D. FOMICHEV, postgraduate student
V.P. ZHUKOV, doctor of Engineering, Head of the Department

Ivanovo State Power University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya 34
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Computational analysis of the effect of non-uniform distribution of heat carriers over the section of the cooling tower on the temperature of the chilled water

Abstract. The paper presents the results of the computational analysis of the cooling tower as a contact multi-flow heat exchanger, taking into account the une-

ven supply of cooled water and cooling air over the cross section, shows the effect of this unevenness on the efficiency of cooling circulating water.

Key words: multi-flow heat transfer, uneven distribution, heat transfer efficiency.

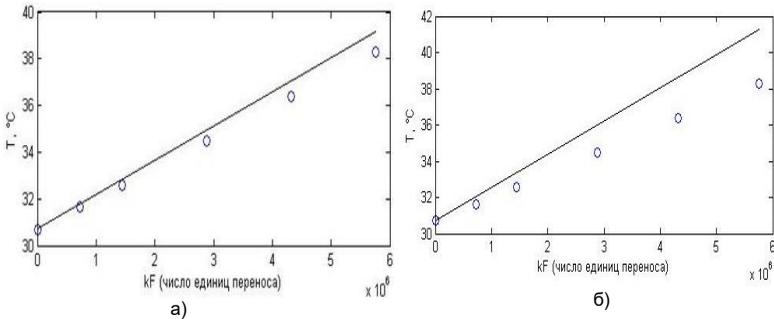
Системы оборотного охлаждения (СОО) ТЭС и АЭС предназначены для организации эффективного теплоотвода от конденсаторов турбин и другого технологического оборудования [1]. В настоящее время в атомной энергетике остро стоит вопрос дефицита маломинерализованных вод в местах строительства крупных АЭС и, следовательно, актуальными является задачи моделирования, расчета и оптимизации режимов работы ССО с градирнями.

Объектом исследования являются процессы теплообмена, протекающие в башенных градирнях систем оборотного охлаждения ТЭС и АЭС. Предмет исследований – анализ влияния распределения теплоносителей по поперечному сечению в башенных градирнях на эффективность охлаждения циркуляционной воды. Целью работы является анализ влияния неравномерного распределения теплоносителей по поперечному сечению градирни на температуру охлажденной воды и эффективность работы оборудования.

Для моделирования процессов тепломассообмена (ТМО) используется математическая модель, построенная на дифференциальных уравнениях баланса массы и энергии [2].

Поперечное сечение башенной градирни в ходе исследования было условно радиально поделено на 4 равные по площади части, через которые неравномерно подавались потоки теплоносителей: воздуха и воды. В исследовании рассматривается башенная градирня БГ-1600. Суммарный постоянный расход воздуха составляет – 8000 кг/с; воды – 3466 кг/с. Для проверки адекватности расчетов были рассмотрены номограммы, разработанные компанией АО «Фирма ОРГРЭС» [3].

Результаты расчета при неравномерной подаче воздуха приведены на рис. 1. Результаты расчета температуры охлажденной воды при неравномерной подаче воды по сечению градирни приведены на рис. 2.



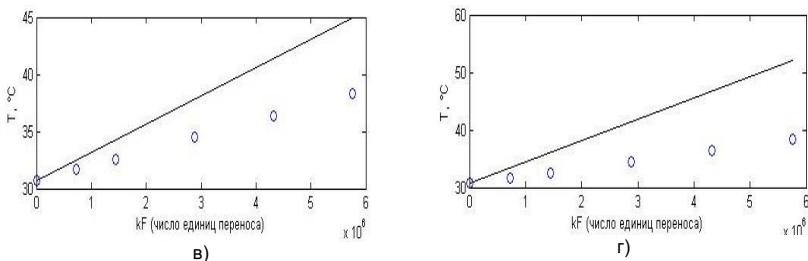


Рис. 1. Результаты расчета температуры охлаждающей воды при различном распределении расхода воздуха по выделенным частям сечения градирни:
 а) [2000 2000 2000 2000]; б) [4000 2000 1500 500];
 в) [1000 1000 1000 5000]; г) [500 6500 500 500], кг/с

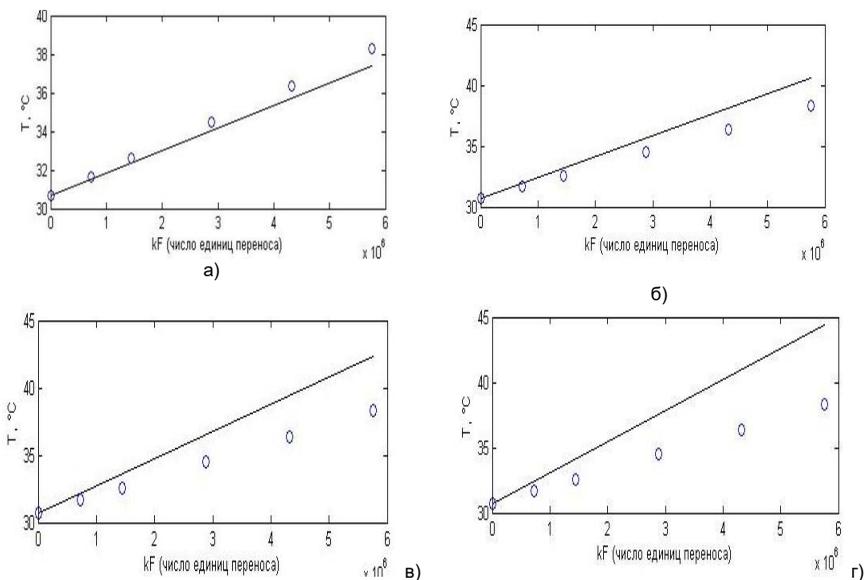


Рис. 2. Результаты расчета температуры охлаждающей воды при неравномерном распределении расхода воды по выделенным частям сечения градирни:
 а) [1200 700 400 1166]; б) [600 966 1300 600]; в) [466 1100 1000 1000];
 г) [1100 1100 366 1100], кг/с

В результате расчетов установлено, что в случае неравномерного распределения воздуха и воды по сечению градирни падение охлаждающей способности составляет в среднем 6-7 %, что приведет к значительному ухудшению вакуума в конденсаторе турбин и избыточному расходу ресурсов. Решение задачи по равномерному распреде-

лению теплоносителей при различных нагрузках и различных метеорологических условиях позволяет ставить и решать задачи по диагностике состояния оборудования СОО.

Литература

1. Лаптев, А.Г., Башаров, М.М., Лаптева, Е.А. Математические модели и методы расчетов тепломассообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах. – Казань: ТНТ: 2021. – 288 с.

2. В.П. Жуков, М.Д. Фомичев, В.Н. Виноградов, А.Е. Барочкин, А.Н. Беляков. Моделирование и расчет процесса тепломассообмена в башенных градирнях систем оборотного охлаждения ТЭС и АЭС. // Вестник ИГЭУ. – 2022. – № 3. – С. 57-63.

3. Указания по нормированию показателей работы гидроохладителей в энергетике (РД 34.09.212): утверждено зам. начальника Главтехуправления Д. Я. Шамараковым 7.02.1980 г. – Главное техническое управление по эксплуатации энергосистем. – Москва: Южтехэнерго, 1981. – 37 с.

УДК 533.6.011.6

Ю.А. ХАХАЛЕВ, к.т.н.,
М.И. КОРНИЛОВА, аспирант,
Л.В. ХАХАЛЕВА, к.т.н., доцент
В.Д. ХЛОНД, студент

Ульяновский государственный технический университет
432027 Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д.32
E-mail: ulstu-td-ua@mail.ru, masha.kornilova.1995@mail.ru, larvall@mail.ru,

Моделирование процесса горения газообразных топлив в коммерческом пакете STAR CCM+

Аннотация. Статья посвящена вопросам моделирования процесса горения газообразных топлив в коммерческом пакете Star CCM+. Приведен краткий обзор методов моделирования процесса горения газовых смесей, методика и результаты численного исследования процесса горения биогаза. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными из разных источников.

Ключевые слова: численное исследование, математическое моделирование, модель горения, уравнение Навье–Стокса, модель турбулентности

Yu.A. KHAKHALEV, Ph.D.,
M.I. KORNILOVA, graduate student,
L.V. KHAKHALEVA, Ph.D., Associate Professor,
V.D. HLOND, student

Ulyanovsk State Technical University
432027 Russia, Ulyanovsk, st. Northern Crown, 32
E-mail: ulstu-td-ua@mail.ru, masha.kornilova.1995@mail.ru, larvall@mail.ru

Simulation of the combustion process of gaseous fuels in the commercial program STAR CCM+

Annotation. The article is devoted to the modeling of the process of combustion of gaseous fuels in the Star CCM+ commercial package. A brief review of methods for

modeling the process of combustion of gas mixtures, the methodology and results of a numerical study of the combustion of biogas is given. The results obtained are in satisfactory agreement with data from different sources.

Key words: numerical study, mathematical modeling, combustion model, Navier-Stokes equations, turbulence model

Глобальное потепление и проблемы, связанные с накоплением мусора, сегодня вызывают всеобщую обеспокоенность и повышенное внимание [1-4]. Технологии, применяемые в энергетической отрасли в настоящее время, являются одной из главных причин парникового эффекта, поэтому необходимо прикладывать усилия по повышению экологичности получения и процесса сжигания топлива. К проблеме можно подойти с разных сторон, в том числе с привлечением математического моделирования, позволяющего определять характеристики процесса горения топлив, исследовать эффективность различных видов топлив, прогнозировать результаты применения различных топливных смесей и предлагать усовершенствование конструкций и оптимизацию режимов работы котлов. При получении свалочного газа или биогаза из бытовых и промышленных отходов мы одновременно получаем ценное топливо и утилизируем отходы.

При математическом моделировании используется система нелинейных дифференциальных уравнений движения, энергии, неразрывности, замыкаемых моделью турбулентности, с учетом химических реакций. Так как процесс сжигания топлива объединяет различные физические явления, решать данные задачи надо сопряженно. Наиболее часто применяемыми подходами в моделировании горения являются: модель вихревого затухания (EDM), модель тонкого фронта пламени (FGM), модель конечных скоростей реакций (BVM). Обычно для моделирования используются платформы ANSYSFluent, STAR CCM, но может использоваться и оригинальное ПО [1-4].

Авторами предпринято математическое исследование процесса горения метана и биогаза в водогрейном котле в пакете STAR CCM+AcademicPack. Использовались усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса с $k-\epsilon$ моделью турбулентности. В качестве модели горения применялась модель вихревого затухания EddyBreak-up. На рис. 1 показана геометрическая модель водогрейного котла с расчетной сеткой.

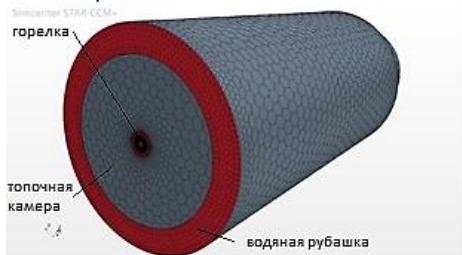


Рис. 1. Геометрическая модель с расчетной сеткой

Начальные условия задавались свойствами газа, векторами скорости и температуры на входе, давлением на выходе. Граничные условия включают скорость на поверхности топочной камеры, принимаемой равной 0. Численное решение реализуется в программе методом конечных объемов.

На рис. 2 показано распределение температур в продольном сечении топочной камеры и водяной рубашки при сжигании биогаза.

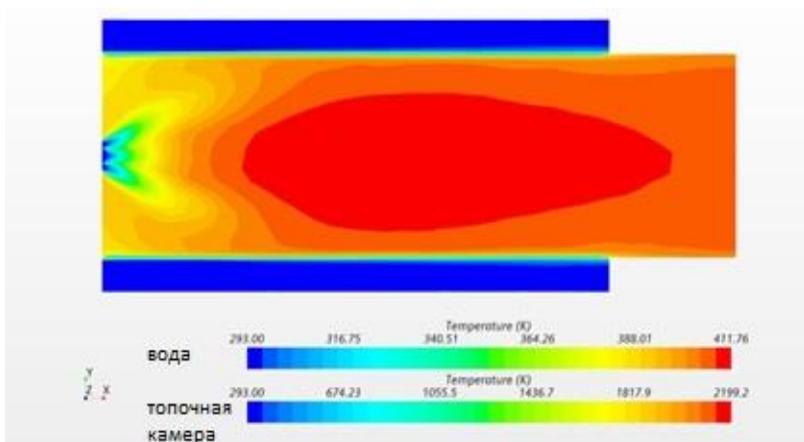


Рис. 2. Поля температур в продольном сечении (биогаз)

Полученные результаты показывают, что при сжигании биогаза температура в топке ниже, чем при сжигании метана. Это способствует снижению выбросов парниковых газов и NO_x.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации (075-15-2021-584)

Литература

1. Jancauskas A., Buinevicius K. Combination of Primary Measures on Flue Gas Emissions in Grate-Firing Biofuel Boiler// *Energies*.– 2021.– №14.– P.793.
2. Мизхер У., Бусыгин С.В., Чукалин А.В., Ковальногов В.Н., Федоров Р.В. Моделирование и исследование процессов горения топливовоздушных смесей на основе биогаза // *Вестник УлГТУ*.–2020.– №2-3.– С.35 – 41.
3. Mohammad J.R., Mohammad S., Hadi P. Comparison of combustion models based on fast chemistry assumption in large eddy simulation of pool fire.// *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2020 – P.15.
4. Аскарова А.С., Болегенова С.А. Моделирование турбулентного тепло-массо-переноса в высокотемпературных и химически реагирующих потоках. – Алматы: Қазақуниверситеті, 2018. – 353 с.

УДК 533.6.011.6

Л.В. ХАХАЛЕВА, к.т.н., доцент,
М.И. КОРНИЛОВА, аспирант,
Ю.А. ХАХАЛЕВ, к.т.н.
Д.А. ДЕМИДОВ, магистрант

Ульяновский государственный технический университет
432027 Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д.32
E-mail: larvall@mail.ru, masha.kornilova.1995@mail.ru,
ulstu-td-ua@mail.ru, big-d-17@mail.ru

Математическое исследование аэродинамики одиночной турбины

Аннотация. В статье рассматривается математическое исследование аэродинамики одиночной ветряной турбины. Применялась система осредненных уравнений по Рейнольдсу Навье-Стокса с турбулентным замыканием моделью Спаларта-Аллмареса. Моделирование выполнено в коммерческом ПО STAR CCM+ AcademicPack. Приводятся результаты моделирования. Результаты удовлетворительно согласуются с данными других исследователей.

Ключевые слова: ветровая турбина, аэродинамический след, уравнения Навье-Стокса, модель турбулентности, дефицит скорости

L.V. KHAKHALEVA, Ph.D., Associate Professor,
M.I. KORNILOVA, graduate student,
Yu.A. KHAKHALEV, Ph.D.
D.A. DEMIDOV, undergraduate

Ulyanovsk State Technical University
432027 Russia, Ulyanovsk, st. Northern Crown, 32
E-mail: larvall@mail.ru, masha.kornilova.1995@mail.ru, ulstu-td-ua@mail.ru,
big-d-17@mail.ru

Mathematical investigation of aerodynamics of a single turbine

Abstract. The article deals with the mathematical study of the aerodynamics of a single wind turbine. The system of averaged equations according to Reynolds Navier-Stokes with turbulent closure by the Spalart-Allmares model was applied. The simulation was performed using commercial software STAR CCM+ Academic Pack. The simulation results are presented. The results agree satisfactorily with the data of other researchers.

Key words: wind turbine, wake, Navier-Stokes equations, turbulence model, velocity deficit

Сейчас ветроэнергетика переживает момент интенсивного развития и ввода новых мощностей, что вызывает повышенное внимание и интерес к данной отрасли [1-5,6,7,8]. Накоплен первоначальный опыт исследования аэродинамики ветротурбин и выявлены основные закономерности поведения следов. След имеет упорядоченную винтовую структуру с выраженным дефицитом скорости. Природа этого явления

объясняется образованием концевых вихрей, которые способны создать дополнительное ускорение или сильное торможение течения в следе за турбиной, и часть ветровой энергии турбиной отбирается [2, 3, 4]. Имеется теоретическое обоснование этого явления [2, 5]. Расчет аэродинамики турбины производится тремя методами: методом усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), вихре-разрешающим методом (LES) и методом прямого численного моделирования (DNS). RANS метод предполагает получение осредненных характеристик потока. Система уравнений замыкается моделью турбулентности [6]. LES метод использует отфильтрованные уравнения Навье-Стокса, так как предполагается иерархия вихрей: крупных, средних и мелких [5, 6, 7]. DNS метод требует большие вычислительные мощности, поэтому его себе могут позволить не все.

Проведено математическое исследование аэродинамики турбины в пакете STAR CCM+AcademicPack. Использовался RANS метод с турбулентным замыканием моделью Спаларта-Аллмареса. На рис. 1 показана расчетная область с геометрической моделью турбины. Диаметр колеса турбины равен 100 м, длина расчетной области перед турбиной 400 м, после – 800 м. Минимальный размер ячейки 0,01 м, максимальный размер – 5 м.

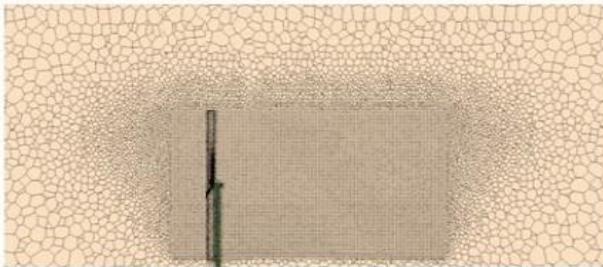


Рис. 1. Расчетная область с построенной сеткой

Начальные условия задавались профилями скорости и температуры на входе, давлением на выходе. Граничные условия определяют скорость на поверхности лопастей, втулки и башни турбины, которая принимается равной 0, также как и на дне расчетной области. Верхняя и боковые границы области – «скользящие». Шаг по времени выбирается равным 0,01мс. Численное решение системы уравнений осуществляется решателем программы, реализующим метод конечных объемов [6].

На рис. 2 показан аэродинамический след за турбиной.

Полученные результаты демонстрируют упорядоченную винтовую структуру следа за турбиной, и снижение скорости на удалении 1 - 4 диаметров с постепенным восстановлением профиля скорости на удалении 8 диаметров, что соответствует известным экспериментальным и численным результатам других исследователей [1-5, 7, 8].

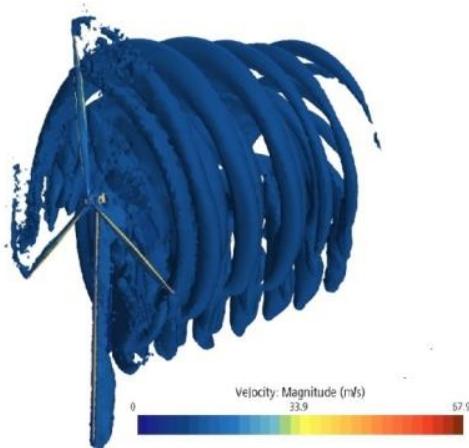


Рис.2. Аэродинамический след за турбиной

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-19-00030, <https://rscf.ru/project/22-19-00030/>

Литература

1. Wu Y.T., Porté-Agel F. Large-Eddy Simulation of Wind-Turbine Wakes: Evaluation of Turbine Parametrisations // *Boundary-Layer Meteorology*.– 2011.– 138(3).– P. 345-366.
2. Vermeer L.J., Sorensen J.N., Crespo A. Wind turbine wake aerodynamics // *Progress Aero Sci.*– 2003.– 39.–P. 467–510.
3. Окулов В. Л. Роль физического моделирования в развитии роторной аэродинамики (обзор). // *Теплофизика и аэромеханика*.– 2018.– 25(1).– С.1-22.
4. Наумов И.В., Миккельсен Р.Ф., Окулов В.Л. Оценка дальности распространения следа и уровня его пульсаций за роторами ветрогенераторов// *Теплоэнергетика*.–2016.– № 3.– С. 54–60.
5. Kalaf M., Menevo K., Meyers J. Simulation study of large eddies in fully formed boundary layers of a wind turbine array // *Fizika Zhidkov*.– 2010.– 22(1).–P. 1-16.
6. Старченко Р.В., Нутерман Р.Б., Данилкин Е.А. Численное моделирование турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2015. – 252 с.
7. Abkar M., Porté-Agel F. Effect of atmospheric stability on wind turbine wakes: a simulation study of large eddies // *Phys. Fluids*.– 27, 035104 (2015); <https://doi.org/10.1063/1.4913695>.
8. Стрижак С.В. Математическое моделирование параметров потока одиночной ВЭУ // *Высокие технологии гражданской авиации*.– 2016.– 19 (6).–С. 176–184.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: ieveselova@yandex.ru

Вычисление некоторых многомерных интегралов от майеровских диаграмм системы твердых сфер

Аннотация. В работе приведены результаты интегрирования суммы двух майеровских диаграмм, включающих в себя «мостиковую» диаграмму. Интегрирование проводилось для модельной системы потенциал твердых сфер.

Ключевые слова: вириальный ряд бинарной функции распределения, майеровская диаграмма, система твердых сфер, многомерный интеграл, повторный интеграл.

I.E. VESELOVA, Candidate of Sciences in Technology

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, st. Rabfakovskaya 34
E-mail: ieveselova@yandex.ru

Calculation of some multidimensional integrals from the Mayer diagrams of a system of hard spheres

Annotation. The paper presents the results of integrating the sum of two Mayer diagrams that include a «bridge» diagram. The integration was carried out for the model system of the potential of hard spheres.

Key words: virial series of binary distribution function, Mayer diagram, system of hard spheres, multidimensional integral, iterated integral.

Бинарная функция распределения (БФР) является важным объектом изучения в статистической теории классической однокомпонентной жидкости [1]. Одним из представлений БФР является разложение в ряд по плотности (вириальный ряд).

При условии аддитивности потенциальной энергии вириальный ряд БФР принимает вид:

$$F_2(r) = e^{-\frac{1}{kT}U(r)} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \rho^n \cdot B_n(r). \quad (1)$$

Вириальное разложение (1) удобно записывать с использованием майеровских диаграмм [2] (графического представления интегралов от произведений майеровских функций).

Майеровские диаграммы состоят из полевых (белых) и корневых (черных) вершин, соединённых линиями. Линия, соединяющая две вершины, обозначает функцию Майера:

$$f_{ij} \equiv f(r_{ij}) \equiv f(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) = e^{-\frac{1}{k \cdot T} \cdot U(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|)} - 1. \quad (2)$$

По координате, соответствующей корневой вершине, производится интегрирование с делением на удельный объем. Каждой диаграмме, содержащей более одной линии и несколько черных вершин, соответствует многомерный интеграл от произведения майеровских функций.

При анализе структуры и свойств жидкой фазы реальных веществ используются различные модельные системы: потенциал твердых сфер, мягких сфер, Леннарда-Джонса и другие.

Простейшей для моделирования является система твердых сфер, потенциал взаимодействия частиц которой представим:

$$U(r) = \begin{cases} \infty, & 0 \leq r < \sigma, \\ 0, & r \geq \sigma. \end{cases} \quad (3)$$

Функция Майера для системы твердых сфер:

$$f(r) = \begin{cases} -1, & 0 \leq r < \sigma, \\ 0, & r \geq \sigma. \end{cases} \quad (4)$$

Далее совершен переход к безразмерным единицам (все расстояния вычисляются в единицах σ).

Nijboer B.R.A. и VanHove L.[3], используя преобразование Фурье, провели вычисление шестикратного интеграла в трехмерном пространстве:

$$I(r_{12}) = I(r) = X(r) = \int f_{13} \cdot f_{14} \cdot f_{23} \cdot f_{24} \cdot f_{34} \, d\mathbf{r}_3 \, d\mathbf{r}_4, \quad (5)$$

соответствующего «мостиковой» диаграмме (рис.1.а), входящей в коэффициент $B_2(r)$ вириального разложения (1) бинарной функции.

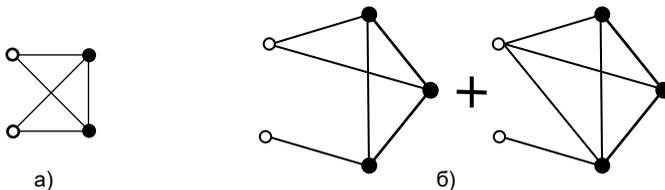


Рис.1. «Мостиковая» диаграмма (а) и сумма двух вычисляемых в данной работе диаграмм (б)

Используя результаты[3], были проведены вычисления суммы двух майеровских диаграмм, входящих в коэффициент $B_3(r)$ вириального разложения (1) бинарной функции (рис.1.б).

Сумма двух вычисляемых диаграмм представима девятикратным интегралом:

$$I(r_{12}) = \int f_{23} \cdot f_{34} \cdot f_{45} \cdot f_{15} \cdot f_{24} \cdot f_{35} \cdot (1 + f_{25}) \, d\mathbf{r}_3 \, d\mathbf{r}_4 \, d\mathbf{r}_5, \quad (6)$$

Интеграл (6) был приведен к тройному интегралу, содержащему функцию $X(r)$ (5):

$$I(r_{12}) = \int X_{25} \cdot f_{15} \cdot (1 + f_{25}) dr_5, \quad (7)$$

Тройной интеграл (7) путем двойного преобразования системы координат и интегрированием по азимутальному углу φ в сферической системе координат был сведен к повторному интегралу:

$$I(R) = \frac{2\pi}{R} \int_0^{\infty} r \cdot (1 + f(r)) \cdot X(r) dr \int_{|R-r|}^{R+r} t \cdot f(t) dt, \quad (8)$$

Вычисление интеграла (8) происходило путем разбиения области интегрирования на несколько частей, с последующим использованием программного пакета системы компьютерной математики.

Результаты вычислений получены в виде кусочно-гладкой функции, график которой представлен на рис. 2.

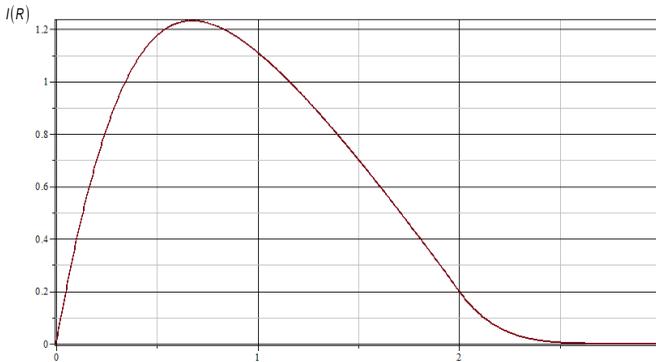


Рис.2. Графическое представление результатов интегрирования $I(R)$.

Вывод: полученная кусочно-гладкая аналитическая функция от суммы двух майеровских диаграмм, позволяет получить новое, более точное приближение вириального ряда бинарной функции распределения $F_2(r)$.

Литература

1. Крокстон К. Физика жидкого состояния. Статистическое введение. Москва: Мир, 1978.— 400 с.
2. Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. Том 1. Москва: Мир, 1978.— 408 с.
3. Nijboer B.R.A. Radial Distribution of a Gas of Hard Sphere and the Superposition Approximation / B.R.A. Nijboer, L. Van Hove // Phys. Rev. 1952. 85, № 5. P. 777–783.

СЕКЦИЯ 17.

«ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА»

УДК 621.9

И.В. ЯКОВЛЕВ, к.т.н.,
Н.В. АВДОКУНИН, аспирант

Национальный исследовательский университет "МЭИ"
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14
E-mail: YakovlevIV@mpei.ru, AvdokuninNV@mpei.ru

Утилизация вентиляционных выбросов центра обработки данных

Аннотация. В работе производился анализ утилизации сбросной теплоты дата центров при свободном охлаждении (фрикулинг) и разрабатывался удельный параметр экономии топлива.

Ключевые слова: центр обработки данных, утилизация тепла, фрикулинг, экономия топлива

I.V. YAKOVLEV, PhD,
N.V. AVDOKUNIN, postgraduate

National Research University "MPEI"
11250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14
E-mail: YakovlevIV@mpei.ru, AvdokuninNV@mpei.ru

Disposal of data center ventilation emissions

Abstract. In the work, the analysis of waste heat utilization of data centers with free cooling (freecooling) was carried out and a specific fuel economy parameter was developed.

Key words: data center, heat recovery, freecooling, fuel economy

Последнее десятилетие присутствует тенденция к увеличению технической оснащённости населения и обойтись человеку без современных технологий невозможно. Люди повсеместно накапливают, обмениваются и передают информацию с помощью современной техники. Для обеспечения потребностей необходимо предъявить множество требований к современной аппаратуре для корректного хранения данных их передачи и обработки. Все это предрасполагает к увеличению мощностей IT-сектора, потребление электроэнергии которым только за последние годы увеличилось в 2 – 3 раза.

При рассмотрении динамики потребления электроэнергии IT-сектором можно выделить дата – центры как одни из наиболее раз-

вивающихся частей данной сферы. Прогнозы на ближайшие 10 лет показывают ускоренное потребление энергоресурсов, что требует повышенного внимания к вопросам энергоэффективности и энергосбережения в этой сфере.

Наиболее значимой статьёй потребления электроэнергии является охлаждение стоек с оборудованием, которая составляет примерно 50–70% от общего энергопотребления ЦОД (рис. 1) [1]. По данным [2] плотность потока теплоты в расчете на 1 м² площади помещений ЦОД составляет 3 кВт/м². Вся поступающая теплота отводится в окружающую среду. Полагая, что практически вся потребляемая ИТ и вспомогательным оборудованием электрическая энергия превращается в теплоту, можно утверждать, что в окружающую среду выбрасывается до от 35 до 50 % энергии, потребляемой ЦОД.

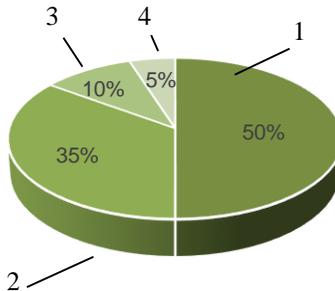


Рис. 1. Распределение потребления электроэнергии дата – центров.
1 – система вентиляции и кондиционирования (50%); 2 – серверное оборудование и компьютеры (35%); 3 – источники бесперебойного питания (10%); 4 – осветительные приборы, датчики сигнализации (5%)

Оценивая потери в виде сбросной теплоты в 30...50% от потребляемой мощности и учитывая, что суммарная мощность ЦОД в России составляет примерно 600 МВт, можно предположить, что в окружающую среду за год выбрасывается в среднем $2,1 \cdot 10^6$ МВт ч/год. Полученное значение потерь тепловой энергии составляет примерно 1% от потребления тепловой энергии в России, которое составляет порядка 2092 ТВт·ч/год [3].

Если темп прироста мощности ЦОД сохранится на уровне 2020 года (13,5–14 %), то к 2030 году следует ожидать потерь в размере $6,3 \cdot 10^6$ МВт ч/год.

Для сравнения энергетической эффективности дата – центров различной мощности существуют общепринятые показатели PUE и DCiE, которые отражают эффективность энергопотребления и долю мощности потребляемой ИТ оборудованием.

Хотя PUE, безусловно, является наиболее известным показателем инфраструктуры центра обработки данных, его критикуют как несовершенный показатель в случаях, когда возникает необходимость описать общую энергоэффективность ЦОД.

Общепринятые критерии энергоэффективности ЦОД не учитывают потерь в виде теплоты, отводимой от ИТ – оборудования, и потерь в виде теплоты от вспомогательного оборудования, а также эффект от использования утилизируемой теплоты ЦОД. Сформулировать подобный критерий помогут результаты исследования возможностей извлечения и применения сбросной теплоты с целью повышения общей энергоэффективности ЦОД.

Заметим, что утилизируемая теплота может применяться как на нужды непосредственно ЦОД, так и на внешние нужды. В силу специфики энергопотребления ЦОД возможности внутреннего использования ограничены и внешнее использование сбросной теплоты представляется перспективным.

Анализ систем поддержания температурного режима машинных залов ЦОД показал [3], что из всех применяемых систем наиболее готовы к внедрению утилизаторов сбросной теплоты системы охлаждения наружным вентиляционным воздухом (фрикулинг) или системы жидкостного охлаждения. Второй способ представляется перспективным с позиции эффективного отвода теплоты достаточно высокого потенциала (до 50-60 °С), но технически сложен и находится в стадии разработки. Фрикулинг успешно применяется и позволяет использовать теплоту вентиляционных выбросов на собственные нужды ЦОД, снижая потребление энергии на обеспечение температурного режима оборудования. Предлагается другую часть сбросной теплоты применять ко внешним потребителям, повышая ее потенциал, например, посредством теплового насоса, работающего по парокомпрессионному циклу (рис. 2).

Полагая, что оптимальный диапазон температур работы оборудования ЦОД находится в пределах 18-27 °С [4], работу вентиляции можно разделить на три режима:

- $t < 18^{\circ}\text{C}$ – режим, в котором необходимо подогревать приточный воздух, подаваемый на охлаждение оборудования (подогрев происходит путем смешения наружного и части удаляемого воздуха);
- $18^{\circ}\text{C} < t < 27^{\circ}\text{C}$ – режим, в котором удаляемый воздух полностью направляется в теплообменник – утилизатор 2 на рис. 2;
- $t > 27^{\circ}\text{C}$ – режим, в котором приточный воздух необходимо предварительно охладить, удаляемый с полным расходом направляется в теплообменник – утилизатор 2.

В итоге, в первом режиме работы вентиляции часть теплоты используется на нужды ЦОД, а другая – направляется внешним пользователям. В других режимах полный расход удаляемого воздуха направляется на охлаждение в теплообменнике-утилизаторе 2.

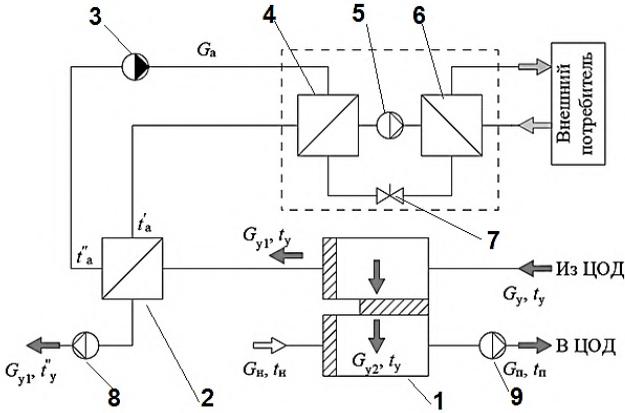


Рис. 2. Принципиальная схема вентиляции машинного зала ЦОД:
 1 – камера смешения с регулируемыми заслонками; 2 – теплообменник-утилизатор; 3 – циркуляционный насос; 4 – испаритель теплового насоса; 5 – компрессор; 6 – конденсатор; 7 – дроссельный клапан; 8 – приточный вентилятор; 9 – вытяжной вентилятор

В работе предлагается критерий оценки энергоэффективности внешнего использования сбросной теплоты ЦОД, представляющий собой удельный показатель в виде экономии энергоресурсов на источнике тепловой энергии в условном топливе. Годовую экономию в условном топливе удобно отнести к количеству энергии, выделяемой ЦОД за расчетный период, выраженному в расходе условного топлива ($\Delta Q_{z_0} b_Q$):

$$\Delta b = \frac{\Delta Q_{\text{в.п}}}{\Delta Q_{z_0} b_Q} = \varepsilon \frac{1}{\mu - 1} \left(\mu - \frac{b_P}{b_Q} \right) \left[\left(\sum_1^N \frac{t_y - t'_a}{t_y - t_{\text{ни}}^{\text{сп}}} \cdot \frac{\tau_i}{z_0} \right) + \frac{t_y - t'_a}{t_y - t_{\text{п}}} \cdot \frac{z_3}{z_0} \right], \quad (1)$$

где μ – коэффициент трансформации энергии теплового насоса при температуре теплоносителя на входе в испаритель; ε – эффективность теплообменника утилизатора; z_0 – число часов в году, ч; z_3 – длительность рассматриваемого периода, ч; τ_i – длительность периода со средней температурой наружного воздуха $t_{\text{ни}}^{\text{сп}}$; $t_{\text{п}}$ – температура приточного воздуха, °С; $t_{\text{уд}}$ – температура удаляемого воздуха из ЦОД, °С; t'_a – температура антифриза на входе в теплообменник-утилизатор, °С; b_Q , b_P – удельный расход условного топлива, кг у.т/Вт·ч, на выработку тепловой энергии и удельный расход условного топлива, кг у.т/кВт·ч, на выработку электрической энергии.

Как видно из (1), удельная экономия зависит от энергетических характеристик оборудования (теплообменника – утилизатора и теплового насоса), соотношения удельных затрат на выработку энергоносителей

и климатических условий, которые в данном случае задаются дискретной зависимостью числа часов стояния средних температур наружного воздуха ($\tau_i t^{cp}_H$)

Для выявления зависимости от климатических условий необходимо рассмотреть регионы с холодным и теплым климатом. Для сравнения были выбраны следующие города: Екатеринбург, Москва (по данным 2018), Владивосток, Краснодар. Расчеты проводились при прочих равных условиях.

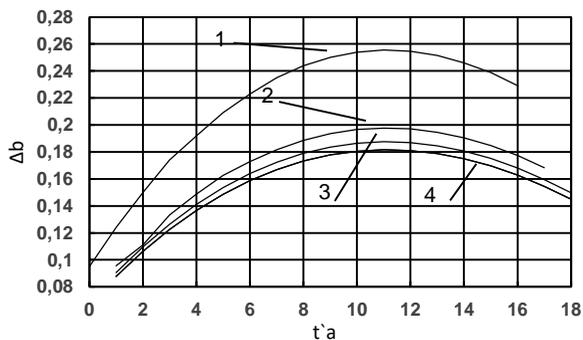


Рис. 3. Зависимость экономии энергоресурсов от температуры антифриза на входе в теплообменник утилизатор:

1 – Краснодар; 2 – Екатеринбург; 3 – Москва; 4 – Владивосток

Теоретический потенциал энергосбережения в наибольшей мере реализуется в случае, когда длительность периода с температурой наружного воздуха более 27 °С имеет наибольшее значение (для климатических условий г. Краснодара на рис. 3).

Расчеты показали существенное влияние температуры промежуточного теплоносителя в контуре, объединяющем теплообменник – утилизатор и испаритель теплового насоса, на энергетическую эффективность процессов утилизации и повышения потенциала теплоты. Зависимость удельной экономии условного топлива на источнике от температуры теплоносителя имеет максимум. Выбор температуры промежуточного теплоносителя в рамках сделанных в работе допущений позволяет оптимизировать рассматриваемый процесс.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, гос. задание № FSWF-2023-0017.

Литература

1. Энергопотребление дата-центров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.grandmotors.ru/dc_power_consumption.php. – Дата доступа: 29.03.2022.

2. Хомутский Ю. Почему центры обработки данных охлаждаются отдельно? Общие требования и особенности СКВ ЦОД // Мир климата. 2017. № 104. С. 92–97.

3. Яковлев И.В. Перспективы и техническая реализация утилизации сбросной теплоты центров обработки данных / Яковлев И.В., Авдокунин Н.В. Энергосбережение – теория и практика: Труды Одиннадцатой Всероссийской конференции «Энергосбережение – теория и практика» (Москва, 10–14 октября 2022 г.) – М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2022.

4. Методические рекомендации по проектированию центров обработки данных. Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве. М.: Минстрой России, 2019.

УДК 621.6.022

А.В. БАННИКОВ, к.т.н. доцент,
М.В. КОЗЛОВА, к.т.н., старший преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: mariyakozylova1996@gmail.com, avbannikov_pte@mail.ru

Исследование работы гигроскопической опреснительной установки с компрессией паровоздушной смеси

Аннотация. В работе приводятся конструкция и особенности работы опреснительной установки гигроскопического типа с компрессией паровоздушной смеси.

Ключевые слова: гигроскопический метод, опреснение, паровоздушная смесь, морская вода.

A.V. BANNIKOV, Candidate of Engineering, docent
M.V. KOZLOVA, Candidate of Engineering, senior lecturer

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: mariyakozylova1996@gmail.com, avbannikov_pte@mail.ru

Investigation hygroscopic desalination plant of the operation with compression of a vapor-air mixture

Abstract. The paper presents the design and features of the desalination plant of hygroscopic type with compression of vapor-air mixture.

Key words: hygroscopic method, desalination, vapor-air mixture, sea water.

Растущий дефицит пресных водных ресурсов является одной из актуальных проблем современности. Вариантом преодоления дефицита пресной воды является опреснение морских и солоноватых вод.

Одним из направлений развития опреснительных систем является совершенствование существующих методов опреснения, а также поиск и исследование альтернативных им.

В силу своих преимуществ гигроскопический метод опреснения является перспективным и конкурентноспособным по отношению к дистилляционному и обратноосмотическому методам опреснения. В этой связи актуальным является повышение эффективности опреснительных установок, функционирующих на базе данного метода.

Так как в процессе опреснения гигроскопическим методом возникает необходимость отвода тепловой энергии от насыщенной паровоздушной смеси (ПВС) и потребность в тепловой энергии более высокого потенциала для обеспечения процесса насыщения воздушного потока, то актуальным становится включение в цикл работы установки трансформатора тепла [1]. Авторами было разработано техническое решение по повышению эффективности опреснителей гигроскопического типа за счет включения в их цикл трансформатора тепла, принципиальная схема установки приведена на рис. 1.

Тепловой баланс предложенной опреснительной установки гигроскопического типа с компрессией ПВС имеет вид:

$$(L + G_{\text{пв}}) \cdot (h''_{\text{к}} - h'_{\text{к}}) = G_{\text{мв}} \cdot c_{\text{рмв}} \cdot (t'_{\text{мв}} - t''_{\text{мв}}) + G_{\text{мв}} \cdot c_{\text{рр}} \frac{S}{S''} \cdot t_{\text{р}} + G_{\text{пв}} \cdot t_{\text{пв}} \cdot c_{\text{рпв}}, \quad (1)$$

где $h''_{\text{к}}, h'_{\text{к}}$ – энтальпия ПВС до и после компрессора, кДж/кг; L – массовый расход сухого воздуха, кг/с; $G_{\text{мв}}$ – массовый расход, поступающей в установку морской воды, кг/с; $G_{\text{пв}}$ – массовый расход пресной воды, удаляемой из установки, кг/с; $c_{\text{рмв}}, c_{\text{рпв}}, c_{\text{рр}}$ – массовая изобарная теплоемкость морской, пресной воды и рассола, кДж/(кг·К); $t'_{\text{мв}}, t''_{\text{мв}}$ – температура морской воды на входе в установку и в зоне барботаж, °С; $t_{\text{пв}}$ – температура пресной воды, °С; S, S'' – соленость исходной морской воды, соленость рассола, ‰.

Данная установка работает в соответствии с циклом, представленным на рисунке 2, и включает в себя следующие процессы: 1-2 процесс сжатия ПВС в компрессоре, 2-3 процесс осушки ПВС, 3-4 процесс понижения давления в регулирующем клапане; 4-1 насыщение ПВС при барботаже. Построение циклов работы гигроскопических опреснительных установок следует осуществлять в h - d диаграмме Прохорова В.И., на которой нанесены кривые φ/r , что позволяет отображать на ней процессы, протекающие с изменением давления.

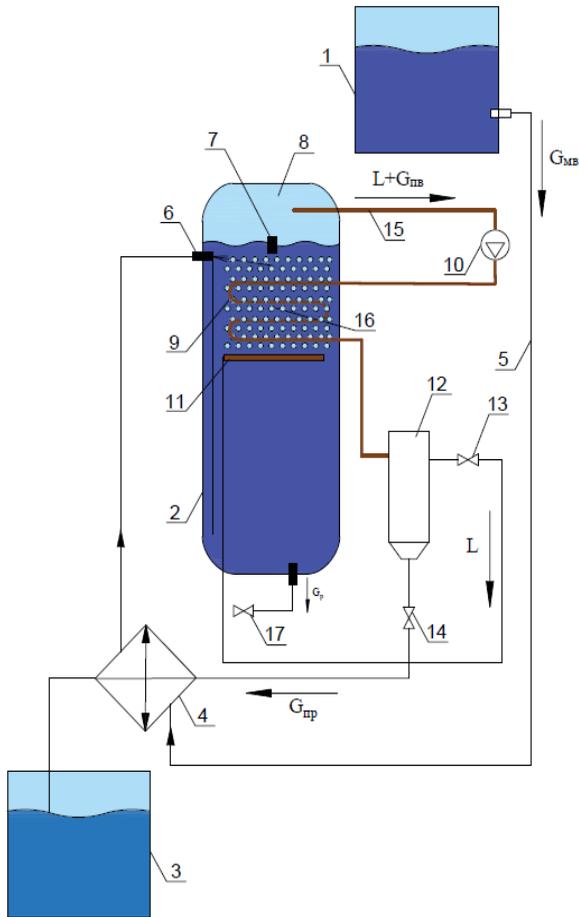


Рис. 1. Принципиальная схема гигроскопической опреснительной установки с контактным испарителем и компрессией паровоздушной смеси [2]:

- 1 – емкость опресняемой воды; 2 – испарительная камера;
- 3 – емкость-сборник пресной воды; 4 – теплообменник исходной опресняемой воды; 5 – переливная труба; 6 – клапан; 7 – датчик уровня воды;
- 8 – нагревательный элемент; 9 – барботажное устройство; 10 – сливное устройство; 11 – зона паро-воздушной смеси; 12 – труба паровоздушной смеси;
- 13 – солнечный коллектор; 14 – компрессор; 15 – сепаратор; 16 – регулирующий клапан; 17 – сливное устройство; $G_{мв}$ – поток морской воды; L – поток осушенного воздуха; $G_{пв}$ – поток пресной воды; G_p – поток рассола; $G_{ра}$ – поток рабочего агента

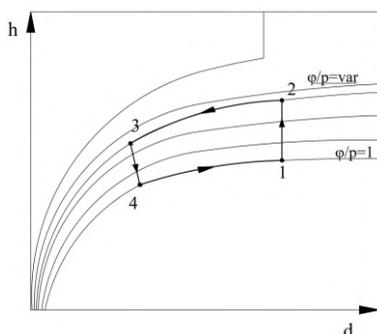


Рис. 2. Цикл работы гигроскопической опреснительной установки с компрессией ПВС:

1-2 – процесс сжатия ПВС; 2-3 – осушка ПВС; 3-4 – понижение давления ПВС в регулирующем клапане; 4-1 – насыщение ПВС

В результате расчетов цикла работы гигроскопической опреснительной установки с компрессией ПВС установлено, что количество энергии, потребляемой для опреснения м^3 пресной воды в зависимости от поддерживаемых параметров при исходной солёности 35‰ находится в диапазоне от 5 до 30 кВт·ч, что свидетельствует об эффективности предложенного технического решения.

Литература

1. Повышение эффективности опреснительных установок гигроскопического типа : автореферат дис. кандидата технических наук : 05.14.04 / Козлова М.В. – Иваново, 2022. – 20 с.

2. Патент на полезную модель № 194759 U1 Российская Федерация, МПК С02F 1/04. Паровоздушная опреснительная установка : № 2019128616 : заявл. 11.09.2019 : опубл. 23.12.2019 / А. В. Банников, П. С. Соколов, М. В. Козлова ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ).

УДК 620.92

С.А. БАННИКОВА, к.т.н. ст. преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: sabannikova_pte@mail.ru

Анализ влияния отбора тепловой энергии от сети теплоснабжения на режим ее работы

Аннотация. Приведены и проанализированы данные математического моделирования работы тепловых сетей.

Ключевые слова: тепловая сеть, тепловые потери, математическая модель.

S.A. BANNIKOVA, Candidate of Engineering Science, senior lecturer

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: sabannikova_pte@mail.ru

Analysis of the impact of heat removal from the heat supply network to its mode of operation

Abstract. Dates of mathematical modeling of heat network work are analyzed and presented.

Key words: thermal network, thermal losses, mathematical model.

Проблемы эффективности системы транспорта тепловой энергии в Российской Федерации в настоящее время обусловлены, в частности, высоким уровнем тепловых потерь, вызванных неудовлетворительным техническим состоянием тепловых сетей, нарушением тепловой изоляции и, связанными с этим, высокими значениями потерь тепловой энергии. Необходимо отметить, что нормативные потери тепловой энергии в тепловых сетях также имеют довольно высокие значения, но необходимо учитывать наличие факторов, приводящих к сверхнормативным значениям тепловых потерь. К таким факторам относятся, например, моральное и физическое старение тепловой изоляции, а также эксплуатация теплопроводов с увлажненной тепловой изоляцией, связанная с большой водопроницаемостью железобетонных элементов каналов.

Оценка величины тепловых потерь в сетях теплоснабжения, произведенная на основе расчета суммарных удельных годовых потерь теплоты тепловой сети, показала, что для, например, часто применяемой двухтрубной тепловой сети диаметром трубопровода 200 мм с подземной канальной прокладкой в непроходных каналах потери составляют 1,16 ГДж тепловой энергии с одного метра тепловой сети за отопительный период. В пересчете на условное топливо, потери теплоты с одного километра тепловой сети за отопительный период эквивалентны 39,2 тоннам условного топлива.

Таким образом, тепловые сети, несомненно, имеют существенный потенциал для разработки и применения систем утилизации тепловых ВЭР, которыми по сути являются тепловые потери в сетях систем теплоснабжения. Утилизируемая при этом энергия может быть использована для решения различных инженерных задач.

Отбор тепловой энергии от сети теплоснабжения в размере нормативных тепловых потерь возможно производить при помощи коллектора устройства по утилизации тепловых потерь [1], расположенного в канале теплотрассы. Необходимым условием отбора энергии от сети теплоснабжения является поддержание стабильного теплового режима работы сети, то есть недопущение увеличения тепловых потерь вследствие работы устройства.

Для оценки влияния отбора тепловой энергии коллектором устройства были разработаны и исследованы математические модели процессов теплообмена в сети теплоснабжения без дополнительных элементов, тепловой сети с применением теплоотражающего экрана и при совместной работе сети с устройством, сопровождающейся отбором тепловой энергии из канала теплотрассы. В результате численных расчетов были построены зависимости, отражающие влияние тепловосприятости коллектора на величины линейной плотности теплового потока с поверхности трубопроводов и линейных потерь с поверхности канала в грунт для двух систем: без теплоотражающего экрана (красные линии) и с теплоотражающим экраном (синие линии) для одно- и двухтрубных тепловых сетей. Пример такой зависимости для двухтрубной тепловой сети с температурным графиком работы 95/70 при расчетной температуре наружного воздуха показан на рис. 1.

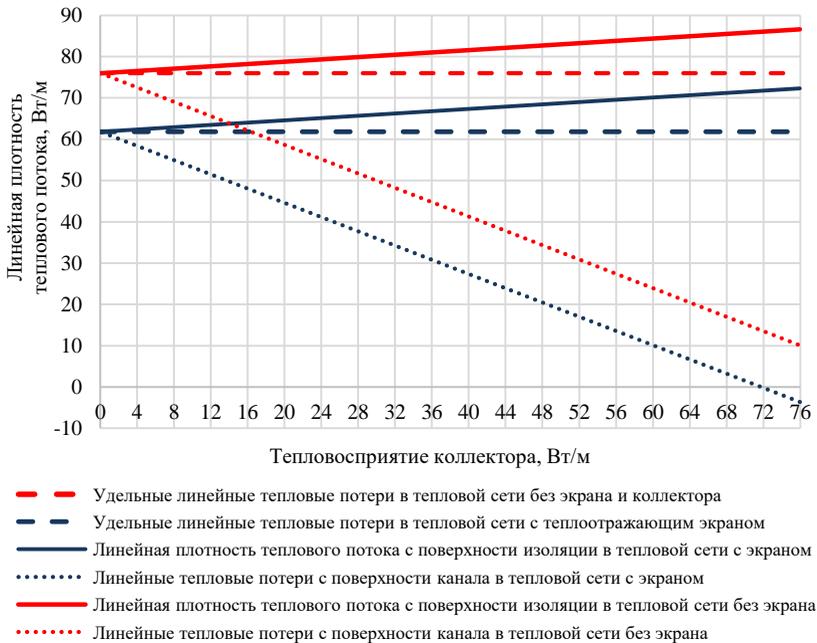


Рис. 1. Влияние тепловосприятости коллектора на тепловой поток с поверхности изоляции и с поверхности канала в двухтрубной тепловой сети с температурным графиком работы 95/70 при расчетной температуре наружного воздуха

Важно отметить, что тепловосприятость коллектора устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы рассматривается в

работе как количество собранной им тепловой энергии с одного метра длины трубопроводов тепловой сети в единицу времени.

Полученные зависимости показывают, что отбор тепловой энергии коллектором из канала теплотрассы в системе без теплоотражающего экрана в размере тепловых потерь, фиксируемых до установки экрана и коллектора, вызывает увеличение линейной плотности теплового потока с поверхности трубопроводов в среднем на 10-14%. Это свидетельствует о недопустимости организации отбора тепловой энергии от сети теплоснабжения подобным образом.

Для ограничения отбора теплоты в устройстве предусмотрен теплоотражающий экран, способный сократить радиационную составляющую теплового потока с поверхности трубопроводов. Результаты исследования показали, что применение теплоотражающего экрана, расположенного у внутренней поверхности канала теплотрассы между коллектором и трубопроводами, позволяет получить принципиально иной результат.

В этом случае линейная плотность теплового потока с поверхности трубопроводов становится на 4% меньше первоначального значения, что говорит о сохранении теплового режима работы сети. При этом, тепловая энергия, в размере 4% от первоначальных потерь, необходимая для достижения требуемого тепловосприятия коллектора, компенсируется энергией окружающего грунта. Однако такой режим совместной работы сети и предлагаемого устройства также недопустим, поскольку он неизбежно вызовет охлаждение и, возможно, промерзание грунта в месте расположения устройства.

Таким образом, отбор тепловой энергии, допустимый с точки зрения сохранности теплового режима сети теплоснабжения, определяется нулевым отбором энергии из окружающего грунта. По результатам анализа математического моделирования допустимый отбор тепловой энергии от сети с установленным теплоотражающим экраном находится в диапазоне от 93% до 95,2% от первоначальных тепловых потерь.

Литература

1. Устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы: пат. 94988 Рос. Федерация: МПК E02D 1/00 (2006.01) / Захаров В.М., Банникова С.А.; заявитель и патентообладатель Ивановский гос. энергетич. ун-т. – № 2010105334/22: заявл. 15.02.2010; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 16.

УДК 662.659

Р.В. БЕЗУГЛОВ, к.т.н., доцент,
В.В. ПАПИН, к.т.н., доцент,
Е.М. ДЬЯКОНОВ, к.т.н., доцент,
Н.А. ВЕДМИЧЕВ, аспирант,
В.Р. ФИЛИМОНОВ, аспирант

Южно-Российский государственный политехнический университет
имени М.И. Платова
346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск,
ул. Просвещения, 132
E-mail: d.v.dobrydnev@gmail.com

Разработка технологии переработки твердых бытовых и сельскохозяйственных отходов в продукты, пригодные для сжигания на тепловых электростанциях

Аннотация. В работе приведено описание концепции и схемы процесса переработки твердых бытовых и сельскохозяйственных отходов методом термической газификации. Полученный генераторный газ будет применен в качестве топлива в различных котлах, печах и двигателях, в зависимости от calorificности и состава полученного газа, в том числе на тепловых электростанциях.

Ключевые слова: газификация, твердые отходы, утилизация отходов, тепловая электростанция, топливо из отходов

R. V. BEZUGLOV, PhD, associate professor,
V. V. PAPIN, PhD, associate professor,
E. M. DYAKONOV, PhD, associate professor
N. A. VEDMICHEV, graduate student,
V. R. FILIMONOV, graduate student

Platov South Russian State Polytechnic University
346428, Rostov region, Novocherkassk,
Prosveshcheniya st., 132
E-mail: d.v.dobrydnev@gmail.com

Development of the technology for processing solid household and agricultural waste into products suitable for combustion at thermal power plants

Abstract. The article presents the concept and the scheme of the process of processing solid household and agricultural waste by thermal gasification. The resulting generator gas will be used as a fuel in various boilers, furnaces and engines, depending on the calorific value and composition of the resulting gas, including thermal power plants.

Key words: gasification, solid waste, waste disposal, thermal power plant, fuel from waste.

На настоящий момент очевидно, что проблема накопленных и вновь поступающих отходов – повсеместная проблема не только в нашей стране, но также и в мире. Различные страны как правило борются с вышеуказанной проблемой с разной степенью успеха, используя при этом, в том числе мусороперерабатывающие заводы (МСП), находящиеся в городской застройке, а также вынесенных за территорию крупных населенных пунктов [1-3]. Однако первый вариант подразумевает использование высокоэффективных уловителей вредных веществ, иначе их применение в городской застройке просто недопустимо. Второй вариант предусматривает колоссальные затраты на МПС, в том числе на подвод к ним коммуникаций, которые исчисляются миллиардами капитальных затрат. В этой связи очевидна проблема разработки такой схемы утилизации отходов, которая могла бы быть применена на существующих предприятиях с минимальным вмешательством в его технологический цикл.

В качестве такого решения предлагается схема утилизации твердых бытовых и сельскохозяйственных отходов с переработкой их в твердое и газообразное топливо, которое впоследствии может быть использовано в двигателях, котлах и печах различного назначения. В том числе данное топливо может быть использовано на тепловых электростанциях: твердый коксовый остаток с неполностью прореагировавшим в процессе термической газификации углеродом, который по своей структуре схож с углем (черный, хрупкий, горючий) - может быть использован в качестве добавки в твердое проектное топливо (уголь), предварительно пройдя шаро-барabanную мельницу. Газообразное же топливо может быть использовано в качестве подсветочного топлива. Схема термической газификации твердых отходов представлена на рис. 1.

В бак газификации отходов 1 из опускного газохода парового котла 2 по каналу 5 направляются уходящие газы котла с температурой 800–900 °С, куда также подаются отходы, заранее прошедшие предварительную сортировку и измельчение до размеров 10x10 мм. В баке газификации отходов происходит процесс газификации в атмосфере определенного окислителя (наилучший тип окислителя определяется в процессе расчета и программного и натурного экспериментов). В результате образовывается генераторный газ и твердый коксовый остаток. Газ через канал подачи генераторного газа 3 подается на горелочные устройства 4 для использования в качестве подсветочного топлива котла. Твердый коксовый остаток подается в шаро-барabanную мельницу 6 путем самоссыпания по каналу самоссыпания твердого коксового остатка 7. В шаро-барabanную мельницу также подаются твердое топливо (уголь) и сушильный агент (горячий воздух) посредством существующей на энергоблоке системы топливоподачи. Воздух забирается из атмосферы с помощью вентиляторов 11 и нагревается в поверхностном теплообменнике 9, установленном в подогревательной камере 10. В подогревательную камеру из опускного газохода парового котла

подаются горячие уходящие газы, которые отдают свою теплоту через стенки поверхностного теплообменника воздуху. Далее горячий воздух по каналу подачи твердого топлива 12 поступает в шаробарабанную мельницу с помощью вентиляторов 11. Уголь поступает из бункера сырого угля 8 по каналу подачи твердого топлива 12 в шаробарабанную мельницу 6. В шаробарабанной мельнице 6 твердый коксовый остаток смешивается с основным топливом – углем, измельчается до необходимой тонины помола (R90 в диапазоне 6–10) и сушится горячим воздухом. После чего, полученная пылевидная горячая смесь с воздухом подается в циклон 13. В циклоне 13 за счет центробежных сил и разницы масс пылевидной горячей смеси и воздуха, происходит отделение второго от первого и далее, посредством вентиляторов воздух выводится в атмосферу через патрубок 15, а пылевидная горячая смесь направляется в промежуточный бункер 14, после которого посредством питателей 16 через канал подачи твердой горячей смеси 17 направляется на горелочные устройства.

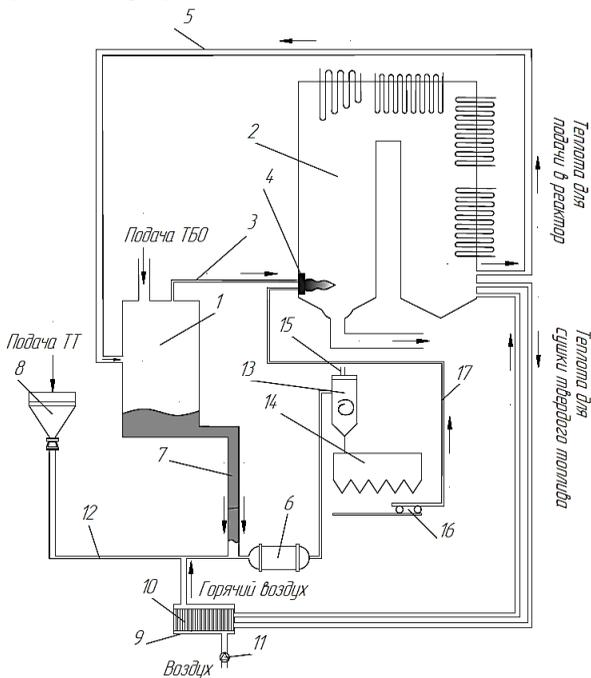


Рис. 1. Расчетная схема газификации отходов

Расчеты процесса газификации проводились по методу минимизации энергии Гиббса с использованием расчетно-моделирующей системы

«Технолог» (ООО «Технософт», Москва) при следующих параметрах: температура 500-1300 °С (шаг – 100 °С) давление 1 атм. Окислитель (газифицирующий агент): воздух (кислород/азот 21/79 %); воздух, обогащённый кислородом (доля кислорода 40-45%); кислород; водяной пар.

Сырьё отбиралось, основываясь на реальные объёмы отходов определенных видов, поступивших на полигоны Ростовской области [4]: отходы упаковочного картона, отходы малоценной древесины, тара деревянная, лузга подсолнечная, шрот подсолнечный.

В общем виде расчеты показали следующие результаты: при температурах 500-700 °С не происходит полной газификации. Начиная с температуры 800 °С начинается полная газификации даже при воздушном дутье, а также при дутье с обогащенным кислородом. При газификации водяным паром отношение H_2/CO составляет больше 2, что позволяет говорить о более чистом генераторном газе, который можно использовать для синтеза жидких углеводородов по методу Фишера-Тропша.

Вывод: учитывая вышеописанное, применяя схему газификации твердых бытовых и сельскохозяйственных отходов возможно решить проблему накопленных и вновь поступающих отходов путем их газификации и сжигания продуктов газификации в существующих печах и котлах, например, на существующих тепловых электрических станциях.

Литература

1. Fanning M., Venn M., Whiting K. Review of state of art waste to energy technologies. Stage two Case studies, S. Wood. 2013. p. 195.
2. Тугов А.Н. Опыт использования твердых коммунальных отходов в энергетике (обзор) // Теплоэнергетика. 2015(12). С. 13-22.
3. Тугов А.Н. Современные технологии термической переработки твердых коммунальных отходов и перспективы их реализации в России (обзор) // Теплоэнергетика. 2021(1). С. 3-20.
4. Электронная модель территориальной схемы обращения с отходами Ростовской области [URL] // <http://www.tbo-rostov.ru> [Дата обращения 20.11.2022 г.]

УДК 621.311

С. В. ВАСИЛЬЕВ, к.т.н., доцент
Н.С. ВЛАДИМИРОВ, магистр

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E – mail: vasilyev.pte@mail.ru, nikita-vladim2402@yandex.ru

Повышение эффективности работы водогрейной котельной

Аннотация. Предложен способ повышения эффективности работы котельной с использованием когенерационной установки, работающей по органическому циклу Ренкина.

Ключевые слова: низкопотенциальная тепловая энергия, энергоустановки малой мощности, органический цикл Ренкина, рабочее тело

S.V.VASILIEV, Candidate of engineering, docent
N.S. VLADIMIROV, student

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E – mail: vasilyev.pte@mail.ru, nikita – vladim2402@yandex.ru

Improving the efficiency of the hot water boiler

Abstract. A method of increasing the efficiency of a boiler using a cogeneration plant operating on the organic Rankine cycle is proposed.

Key words: low – grade heat, low power plants, Organic Rankine Cycle, work fluid

В условиях быстрого роста цен на органическое топливо, а также постоянного увеличения выработки электрической и тепловой энергии важным вопросом энергетики является рациональное использования любой энергии. Сокращение потребления топлива может быть достигнуто либо замещением части выработки энергии альтернативными источниками, либо увеличением энергоэффективности за счет утилизации уходящей теплоты, которая в значительных количествах вместе с продуктами сгорания и охлаждающей жидкостью выбрасывается в окружающую среду. Для котельных одним из важных направлений повышения энергоэффективности является снижения потерь теплоты с уходящими газами.

В современной практике встречаются такие технические решения утилизации низкопотенциального тепла как органический цикл Ренкина (ОЦР), цикл Калины, двигатель Стирлинга, термоэлектрические генераторы, теплонасосные установки. Анализ существующих методов показывает преимущества технологии ОЦР, которая и была принята к исследованию в данной работе.

Цель работы заключается в повышение энергетической эффективности водогрейной котельной за счёт утилизации теплоты уходящих газов с применением технологии, позволяющей преобразовывать тепловую энергию в электрическую, основанной на использовании установки с низкикипящим контуром.

Для осуществления модернизации необходимо решить задачи:

- Исследование вариантов включения установки ОЦР в тепловую схему котельной на основе анализа существующих;
- Выбор низкикипящего рабочего тела (НРТ) и теплового двигателя;
- Расчёт основных элементов ОЦР – расширителя, конденсатора, испарителя;
- Разработка системы утилизации теплоты – рекуператора и анализ необходимости промежуточных контуров.

На первом этапе проводился анализ существующих тепловых схем с ОЦР модулем [1–2] и др. В итоге приняты к рассмотрению следующие тепловые схемы с глубокой утилизацией теплоты уходящих газов:

- схема с прямым включением теплообменных аппаратов, встроенных в газоход котла, использующая для нагрева и испарения НРТ теплоту уходящих газов и частичный отбор прямой сетевой воды;
- схема с промежуточным греющим водяным контуром, в котором для нагрева НРТ используется часть обратной сетевой воды, получившей теплоту от уходящих газов в поверхностных теплообменных аппаратах.

В схемах для отвода продуктов сгорания организуется байпасная линия, позволяющая регулировать мощность паротурбинного цикла и поддерживать температуру уходящих газов выше точки росы на входе в дымовую трубу. Для конденсации НРТ в схемах используется подпиточная вода, либо в сочетании с градирней. Кроме этого в схемах предусматривается возможность охлаждения НРТ в регенеративном теплообменном аппарате после расширителя.

В работе проведены исследования влияния различных параметров на обоснованный выбор НРТ. Основными техническими требованиями к рабочему телу в установках являются:

- низкая температура кипения при давлении не ниже атмосферного;
- высокая плотность, высокая теплопроводность, низкая вязкость;
- термическая стабильность в области повышенных температур;
- нетоксичность, взрыво- и пожаробезопасность;
- низкая стоимость, доступность;

Выбору рабочего агента для энергоустановок на базе органического цикла Ренкина посвящены работы [2–3] и др. Их анализ показывает, что для температур уходящих газов на выходе из водогрейных котлов, в качестве рабочего агента целесообразно рассмотреть R124, R142b, R152a, R227ea, R236fa, R600a. На выбор рабочего агента влияют величина скрытой теплоты парообразования, температура кипения, температура подогрева до состояния насыщения, температура источника тепла и недогрев между средами.

В работе рассмотрен вопрос выбора расширителя в контуре ОЦР, которые можно разделить на скоростные (осевые или радиальные турбины) и объемные расширители (лопостные, поршневые, винтовые и спиральные). Факторы, влияющие на выбор расширительной машины для отработанного и низкопотенциального восстановления тепла, включают в себя скорость вращения, смазку, потери на утечки и трение, диапазон номинальной мощности, сложность, надежность и стоимость. Анализ существующих работ показывает, что наиболее эффективными по совокупности свойств в данном диапазоне мощности являются ПВМ.

В работе предложена схема глубокой утилизации теплоты уходящих газов, в состав которой входят теплообменник пластинчатого типа и

конденсационный теплообменный аппарат поверхностного типа, сформированный из пакета труб, изготовленных из нержавеющей стали.

На основе анализа существующих методов тепловых расчетов элементов теплоутилизационных систем была разработана программа расчета в продукте Microsoft Excel. Структура построения исследуемой расчетной модели базируется на общих уравнениях теплового баланса с учетом характеристик низкокипящих рабочих тел. Данная программа дает возможность осуществить позонный расчет теплообменного аппарата, что позволяет получить более достоверные данные об основных параметрах процесса теплообмена при конденсации водяных паров из парогазовой смеси. Также программа позволяет провести тепловой расчёт основных элементов ОЦР и оценить эффективность работы такой системы. Предложенная методика решения задачи модернизации котельной, ввиду наличия переменных режимов их работы требует индивидуального подхода к каждому конкретному объекту.

В качестве объекта исследования для реализации предложенного варианта повышения энергетической эффективности выбрана водогрейная котельная Ивановской области. Режим работы котельной регламентируется режимными картами, согласно которых выбирается степень загрузки котла и проводится оценка количества дымовых газов и их потенциала.

Для практической реализации предлагаемой модернизации рассмотрены следующие моменты: подбор НРТ, которое по своим термодинамическим характеристикам удовлетворяло бы различным режимам работы котельной; определение эффективных параметров теплообменного оборудования теплоэнергетической установки; количественная оценка величины максимальной электрической мощности, которую можно получить для конкретных условий рассматриваемой котельной.

Литература

1. Васильев С.В., Банников А.В. Повышение эффективности работы котельных с водогрейными котлами / Сб. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVIII «Бенардосовские чтения»), Иваново, 2015 г. – Т. 2: с. 144 – 148;
2. В.А. Маляренко, Когенерация в котельных на основе органического цикла/ А.Л. Шубенко, С.Ю. Андреев, А.В. Сенецкий, Н.Ю. Бабак, И.А. Темнохуд // Коммунальное хозяйство городов. – 2016. – № 130 – с.55 – 64;
3. Крупин Д.Ф. Оптимальный выбор рабочих тел для энергоустановок на базе органического цикла Ренкина // Энерго– и ресурсосбережение: материалы Всероссийской научно–практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием — Екатеринбург: УрФУ, 2016. — С. 152–155.

УДК 658.567.1

Н.А. ВЕДМИЧЕВ, аспирант,
Р.В. БЕЗУГЛОВ, к.т.н., доцент,
В.В. ПАПИН, к.т.н., доцент,
Е.М. ДЬЯКОНОВ, к.т.н., доцент,
В.Р. ФИЛИМОНОВ, аспирант

Южно-Российский государственный политехнический университет
имени М.И. Платова
346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск,
ул. Просвещения, 132
E-mail: vedmichev_na@npi-tu.ru

Исследование возможности переработки отходов в топливо

Аннотация. В работе приведено описание концепции процесса переработки отходов различных видов методом газификации отходов для получения высококалорийного газа.

Ключевые слова: газификация, генераторный газ, утилизация отходов, жидкое топливо, топливо из отходов.

N.A. VEDMICHEV, graduate student
R.V. BEZUGLOV, PhD, associate professor,
V.V. PAPIN, PhD, associate professor
E.M. DYAKONOV, PhD, associate professor
V.R. FILIMONOV, graduate student

Platov South Russian State Polytechnic University
346428, Rostov region, Novocherkassk,
Prosveshcheniya st., 132
E-mail: vedmichev_na@npi-tu.ru

Study of the possibility of processing waste into fuel

Annotation. The paper describes the concept of the process of processing wastes of various types by the method of gasification of wastes to obtain high-calorie gas.

Key words: gasification, generator gas, waste disposal, liquid fuel, fuel from waste.

Во всем мире находит все большее распространение распределенная энергетика, то есть происходит переход от крупных централизованных сетей до малых котельных, работающих на один или несколько потребителей [1].

Стремительный рост населения и промышленных предприятий на нашей планете влечет за собой возрастание объемов отходов, а значит, качество окружающей среды постоянно ухудшается, а природные ландшафты всё чаще подвергаются необратимому процессу разрушения [2]. Очевидна проблема утилизации отходов, рост которых постоянно показывает положительную динамику. Единственный шанс снижения воздействия данной проблемы в мире – это своевременно их переработать с целью вторичного использования, например, в качестве топлива для малых котельных и печей. В этом свете видится актуальным

разработка схемы утилизации отходов для получения полезных продуктов, способных сжигаться в печах и малых котельных.

В данной статье рассматривается концепция утилизации отходов различных видов, прошедших предварительную дегидразацию (обезвоживание), измельченных и направляемых в разрабатываемый реактор газификации.

Для выбора типов отходов необходимо привязаться к реальным объемам поступающих на полигоны отходов. Для подбора отходов использовалась Территориальная схема обращения с отходами Ростовской области за 2022 год – данный статистический документ показывает вид и точное количество отходов, поступивших на полигоны Ростовской области [2]. Из Территориальной схемы были взяты для примера наиболее подходящие 5 видов отходов, которые приведены в табл. 1, которые могут быть отобраны для проведения исследования – математического моделирования, имитационного моделирования (программная модель) и экспериментального исследования.

Таблица 1. **Виды отобранных отходов**

№ п/п	Вид отхода	Qниз.раб, МДж/кг	Кол-во, тонн/год	Энергия, ГДж/год
1	Отходы упаковочного картона незагрязненные	16,5	31578,1	521038,65
2	Тара деревянная, утратившая потребительские свойства	19,6	5421,4	106259,44
3	Отходы малоценной древесины (хворост, валежник)	18,9	24143,5	456312,15
4	Солома	15	20949,6	314244
5	Лузга подсолнечная	19,3	132905,3	2565072,29
Итого		17,86	214997,9	3962926,53

Одной из задач, которую предполагается решить в ходе текущего исследования – разработка технологии получения высококалорийного газа с соотношением H_2/CO больше 2,5, такое отношение позволит использовать метод Фишера-Тропша для синтеза жидких углеводородов. Данный аспект расширит применимость разрабатываемой технологии, то есть после газификатора возможно получать генераторный газ, который после очистки в конденсаторе будет пригоден для синтеза Фишера-Тропша и получения жидкого топлива. Таким образом, определяется возможность использовать печи и котлы не только на газообразном или твердом топливе, но и на жидком.

В ходе проведения исследования для апробации технологии необходимо будет подобрать ряд определенного котельного оборудования именно отечественного производства во избежание проблем, связанных с геополитической обстановкой в мире.

Вывод: разрабатываемая технология должна явиться заменой органического топлива при получении тепловой и электрической энергии в

различных котлах и печах. Полученные продукты газификации могут использоваться как основное топливо (калорийность генераторного газа более 16 МДж/м³), так и подмесом к основному топливу – газообразному, твердому или жидкому.

Литература

1. Воронцов А.В. Оценка перспектив развития распределенной генерации России в рамках развития энергетики России // Вестник ГУУ. 2014. №14. С. 115-120.
2. Потравный И. М., Баах Д. Энергетическая утилизация твердых коммунальных отходов в контексте низкоуглеродного развития // Управленческие науки. 2021. №3. С. 6-22.
2. Электронная модель территориальной схемы обращения с отходами Ростовской области. Раздел 2 «Количество образующихся отходов», Ростов-на-Дону, 2022 [URL] // <http://www.tbo-rostov.ru> [Дата обращения 19.03.2023 г.].

УДК 621.311.22

Д.В. ДОБРЫДНЕВ, аспирант,
В.В. ПАПИН, к.т.н., доцент, Р.В. БЕЗУГЛОВ, к.т.н., доцент,
Е.М. ДЬЯКОНОВ, к.т.н., доцент,
А.С. ШМАКОВ, аспирант

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова
346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132
E-mail: d.v.dobrydnev@gmail.com

Исследование модернизированного паросилового цикла с бромистолитиевым раствором в качестве рабочего тела

Аннотация. В научной статье представлена общая концепция модернизированного паросилового цикла, в котором в качестве рабочего тела применяется водный раствор бромида лития. С целью проведения дальнейших исследований цикла в статье анализируются свойства рабочего тела, его особенности и способы термодинамического анализа. Проанализирована энергетическая эффективность модернизированного цикла.

Ключевые слова: цикл Ренкина, абсорбция, абсорбер, энергоэффективность, тепловая электрическая станция

D.V. DOBRYDNEV, graduate student,
V.V. PAPIN, PhD, associate professor,
R.V. BEZUGLOV, PhD, associate professor,
E.M. DYAKONOV, PhD, associate professor,
A.S. SHMAKOV, graduate student

Platov South Russian State Polytechnic University,
346428, Rostov region, Novocherkassk, Prosveshcheniya st., 132
E-mail: d.v.dobrydnev@gmail.com

Study of a modernized steam power cycle with lithium bromide solution as a working fluid

Abstract. The scientific article presents the general concept of a modernized steam power cycle, in which an aqueous solution of lithium bromide is used as a working fluid. In order to conduct further studies of the cycle, the article analyzes the properties of the working fluid, its features and methods of thermodynamic analysis. The energy efficiency of the modernized cycle is analyzed.

Key words: Rankine cycle, absorption, absorber, energy efficiency, thermal power plant.

Повышение энергетической эффективности существующих и строящихся тепловых электрических станций является одним из приоритетных направлений развития энергетики Российской Федерации, которое отражено в Энергетической стратегии до 2035 года. В общей структуре выработки электроэнергии в России значительная роль отведена паросиловым установкам, работающим по циклу Ренкина. Даже крупные установки, работающие по циклу Ренкина, имеют сравнительно низкую эффективность – значительная часть теплоты (более 50%) теряется в окружающую среду и лишь 35-40% полезно используется. В установках малой мощности эффективность еще меньше. Поэтому повышение эффективности установок, работающих по циклу Ренкина, является приоритетным направлением развития энергетики.

С целью повышения энергетической эффективности цикла Ренкина была разработана технология, в которой процесс конденсации заменен на процесс абсорбции и применяется второе рабочее вещество – абсорбент (или растворитель) для рабочего тела, как и в абсорбционном термотрансформаторе (АБТ), в котором происходят схожие процессы. Схема модернизированного паросилового цикла представлена на рис. 1.

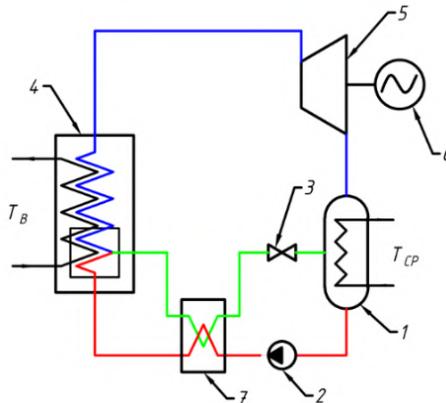


Рис. 1. Схема модернизированного паросилового цикла:

- 1 – абсорбер; 2 – насос растворов (питательный насос); 3 – расширительный вентиль; 4 – генератор пара (котлоагрегат); 5 – паровая турбина;
- 6 – электрический генератор; 7 – регенеративный теплообменник растворов

В модернизированном паросиловом цикле пар после расширения в паровой турбине направляется в абсорбер, в котором находится слабый раствор и поглощается растворителем. Затем раствор в жидком состоянии перекачивается в котлоагрегат. В котлоагрегате (в абсорбционных циклах – генератор пара) вследствие подвода теплоты из раствора выкипает рабочее тело (вода), которое затем направляется далее по поверхностям нагрева в турбину. После котлоагрегата уже крепкий раствор направляется в расширительный вентиль и затем в абсорбер. Важным преимуществом технологии является возможность применения различных пар рабочих веществ. В АБТ наиболее распространенными рабочими веществами являются бромистолитиевый и водоаммиачный раствор. В первом вода является рабочим телом, во втором – абсорбентом [1]. Поэтому в первую очередь на предмет применения в модернизированном паросиловом цикле рассматриваются именно эти растворы. В статье [2] изложены особенности функционирования модернизированного паросилового цикла с водоаммиачным раствором, выполнен термодинамический анализ цикла. В данной работе будут проанализированы особенности цикла с бромистолитиевым раствором, оценены его преимущества и недостатки.

Преимуществом бромистолитиевого раствора является практически нулевая летучесть абсорбента (бромид лития), таким образом в паровой фазе раствора присутствует только один компонент – вода. Это позволяет отказаться от ректификации пара [3]. Также к преимуществам относят высокую абсорбционную способность бромида лития. К недостаткам раствора можно отнести ограниченную растворимость солей бромида лития и, следовательно, риск кристаллизации при нарушении технологического режима. Также водный раствор бромида лития характеризуется сравнительно высокой коррозионной активностью, особенно в условиях высоких температур и концентраций (60% и более), а также на поверхности раздела фаз [4]. Вопросы снижения проявлений коррозионной активности путем включения в цикл поверхностно активных веществ (ПАВ) и ингибиторов коррозии [5] в данной работе не рассматриваются. Исследования различных свойств водного раствора бромида лития представлены достаточно широко как в отечественных, так и в иностранных работах.

В части функционирования модернизированного паросилового цикла наибольший интерес представляет высокая абсорбционная способность бромида лития. Отмечается, что с увеличением концентрации бромистолитиевого раствора (например, слабого раствора в абсорбере) давление насыщенных паров воды над поверхностью данного раствора снижается. На рис. 2 представлена зависимость давления паров воды над поверхностью водного раствора бромида лития от концентрации и температуры данного раствора [6]. Видно, что с увеличением концентрации раствора снижается давление водных паров. К примеру, для температуры конденсации +50°C давление насыщения чистого

водяного пара будет составлять 12,335 кПа, в то же время давление водных паров над поверхностью бромистолитиевого раствора 30% концентрации составляет 9,1592 кПа, а с концентрацией 40% - 6,6128 кПа, то есть практически в два раза меньше. Таким образом применение абсорбента потенциально может снизить давление пара в абсорбере, то есть после паровой турбины.

В то же время для цикла Ренкина известно, что термический КПД цикла расчет с увеличением начальных и снижением конечных параметров пара [7]. С целью оценки эффективности применения бромида лития в модернизированном паросиловом цикле был выполнен термодинамический анализ модернизированного цикла. Для его осуществления требуется совместить методики расчета паросиловых и абсорбционных циклов, которые широко представлены в специальной литературе [8]. Более подробно методика расчета цикла и математическая модель будут представлены в следующих статьях, в данной работе представлены только результаты.

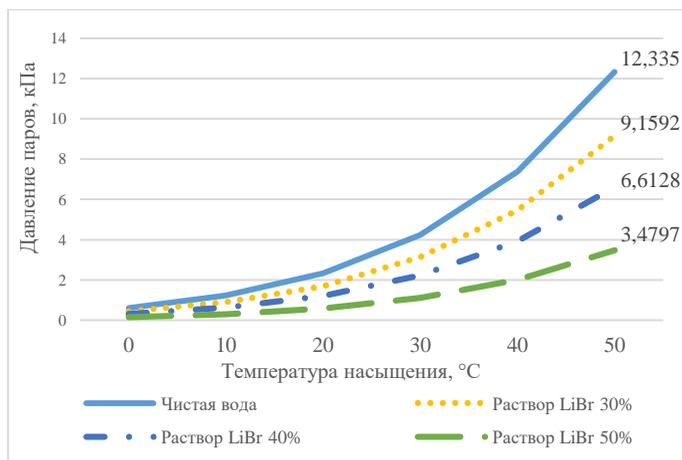


Рис. 2. Зависимость давления водных паров от температуры и концентрации водного раствора бромида лития

Исходные данные для расчета модернизированного и традиционного циклов приняты следующие: температура пара перед турбиной $t_1 = 200$ °C, давление пара перед турбиной $p_1 = 0,5$ МПа, температура охлаждающего источника $t_{\text{охл}} = 25$ °C, разность температур в конденсаторе и абсорбере $\Delta t = 10$ °C. Внутренние относительные КПД турбины и питательного насоса приняты 0,9 и 0,85 соответственно. Результаты расчета традиционного цикла Ренкина приведены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты расчета традиционного цикла Ренкина

Точка	Температура, °С	Давление, кПа	Энтальпия, кДж/кг	Энтропия, кДж/кг·К
1 (пар перед турбиной)	200	500	2855,8	7,061
2 (пар после турбины)	35	5,629	2166,8	7,061
3 (жидкость перед насосом)	35	5,629	146,63	0,505
4 (жидкость после сжатия насосом)	35,013	500	147,13	0,505

Удельные характеристики цикла: полезная работа паровой турбины: $W_T = 620,1$ кДж/кг; потребляемая работа насоса: $W_N = 0,588$ кДж/кг; подведенная к котлу теплота: $Q_K = 2708,67$ кДж/кг; термический КПД: $\eta_t = 22,87\%$. Результаты расчета модернизированного паросилового цикла приведены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты расчета модернизированного цикла Ренкина

Точка	Температура, °С	Давление, кПа	Энтальпия, кДж/кг	Концентрация, %
1 (пар перед турбиной)	200	500	2855,8	0
2 (пар после турбины)	13,52	1,55	2022,8	0
3 (слабый раствор после абсорбера)	35	1,55	265,9	49
4 (слабый раствор после насоса)	37	500	266,174	49
5 (раствор после теплообменника)	112	500	408,678	49
6 (крепкий раствор после котла)	130,47	500	447,6	60
7 (раствор после теплообменника)	47	500	275,1	60
8 (раствор после расширительного устройства)	47	1,55	275,1	60

Удельные характеристики цикла: полезная работа паровой турбины: $W_T = 749,7$ кДж/кг; потребляемая работа насоса: $W_N = 0,322$ кДж/кг; подведенная к котлу теплота: $Q_K = 2447,12$ кДж/кг; термический КПД: $\eta_t = 30,62\%$.

По уравнению состояния была определена концентрация слабого раствора в абсорбере, для температуры охлаждающего источника она равна $\xi_{сл} = 49,6\%$. Данной концентрации соответствует давление водных паров в абсорбере 1,55 кПа, температура пара после турбины равна 13,52 °С. Видно, что в традиционном цикле Ренкина пар будет расширяться до давления 5,629 кПа (энтальпия в конце расширения равна 2166,8 кДж/кг (табл. 1)). В случае модернизированного паросилового цикла давление водяного пара после расширения будет 1,55 кПа, а энтальпия 2022,8 кДж/кг. Важную роль в повышении эффективности цикла играет также регенерация теплоты растворов. Видно, что выхо-

дящий из абсорбера слабый раствор в теплообменнике нагревается с 37 до 112°С. Вследствие снижения подводимой в котлоагрегат и отводимой из абсорбера теплоты снижаются тепловые потери и обеспечивается повышение энергетической эффективности цикла. Это, в свою очередь, приводит к снижению расхода органического топлива и уменьшению вредного влияния на окружающую среду (снижение выбросов вредных веществ в атмосферу и тепловых сбросов в атмосферу). На рис. 3 представлен паросиловой цикл на диаграмме Дюринга, которая широко используется для анализа абсорбционных циклов. Хотя в случае с анализом модернизированного цикла данная диаграмма не отражает всех процессов и точек (в частности, точки 1 и 2, характеризующие водяной пар, не отражены на диаграмме), но на диаграмме представлены процессы в «термохимическом компрессоре», то есть системе абсорбер-насос-котлоагрегат-расширительное устройство.

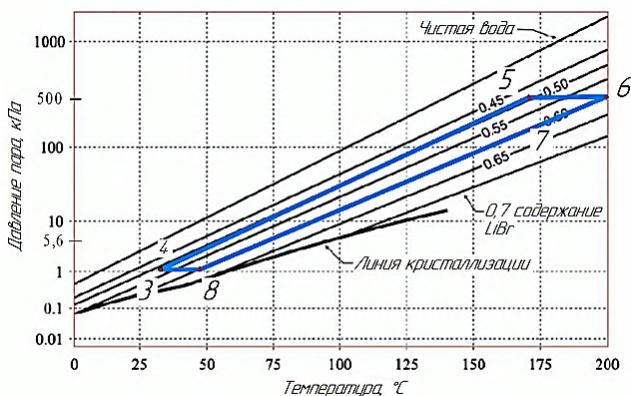


Рис. 3. Процессы в «термохимическом компрессоре» модернизированного паросилового цикла

Вывод. В работе представлены основные особенности модернизированного паросилового цикла с бромистолитиевым раствором в качестве рабочего тела, проанализированы свойства рабочего тела, представлены результаты термодинамического анализа цикла. Исходя из результатов расчета видно, что применение раствора бромиды лития позволяет увеличить полезную работу турбины и увеличить термический КПД паросилового цикла. При одинаковых начальных параметрах пара вследствие снижения конечных параметров увеличивается полезный теплоперепад турбины на 20% (на 129,6 кДж/кг). В итоге термический КПД модернизированного цикла равен 30,62%, что на 8% выше традиционного цикла Ренкина, что также сокращается расход топлива и вредные выбросы в окружающую среду.

Литература

1. Абсорбционные преобразователи теплоты : монография / [А. В. Бараненко и др.] ; Федер. агентство по образованию, Гос. образоват. учреждение высш. образования, С.-Петерб. гос. ун-т низкотемператур. и пищевых технологий. – СПб.:С.-Петерб. гос. ун-т низкотемператур. и пищевых технологий, 2005. – 337 с.
2. Папин В.В., Ефимов Н.Н., Добрыдnev Д.В., Дьяконов Е.М., Безуглов Р.В., Шмаков А.С. Модернизированный паросиловой цикл, работающий по абсорбционному принципу // Промышленная энергетика. – 2022. – № 1. – С. 18-27.
3. Морозюк Т.В. Теория холодильных машин и тепловых насосов / Негоциант. – Одесса, 2006. – 712 с.
4. Andrea Brotzu, Ferdinando Felli, Stefano Natali, and Daniela Pilone. "Pipeline Corrosion Failure in an Absorption Chiller" *Procedia Engineering*, vol. 109, 2015. doi:10.1016/j.proeng.2015.06.205.
5. Степанов К. И., Волкова Ольга Владимировна, Цимбалист Андрей Олегович Исследование коррозионной стойкости нержавеющей сталей в ингибированном водном растворе бромида лития // Вестник МАХ. 2012. №2.
6. Богданов С.Н., Бурцев С.И., Иванов О.П., Куприянова А.В. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ./ Под ред. С.Н. Богданова. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГАХПТ, 1999. – 320 с.
7. Основы современной энергетике : учебник для вузов : в 2 т. / под общей редакцией чл.-корр. РАН Е.В. Аметистова. — 6-е изд., перераб. и доп. —М. : Издательский дом МЭИ, 2016.
8. ASHRAE Handbook 2017 - Fundamentals (SI Edition) // American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Incorporated, 1995.

УДК 620.92

В.В. ПАПИН, к.т.н., доцент,
Р.В. БЕЗУГЛОВ, к.т.н., доцент,
Е.М. ДЬЯКОНОВ к.т.н., доцент,
Н.А. ВЕДМИЧЕВ аспирант,
В.Р. ФИЛИМОНОВ аспирант

Южно-Российский государственный политехнический университет
имени М.И. Платова
346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132
E-mail: *d.v.dobrydnev@gmail.com*

Совершенствование технологии совместного использования топлива и низкопотенциальных источников энергии на примере теплоэнергетического комплекса

Аннотация. В работе показаны результаты исследований эффективности новых комбинированных теплонасосных циклов, работающих от ДВС в сравнении с существующими тепловыми насосами и котлами.

Ключевые слова: тепловой насос, трансформатор теплоты, энергетический комплекс, теплоснабжение.

V. V. PAPIN, PhD, associate professor,
R.V. BEZUGLOV, PhD, associate professor,
E.M. DYAKONOV, PhD, associate professor
N.A. VEDMICHEV graduate student,
V.R. FILIMONOV graduate student

Platov South Russian State Polytechnic University
346428, Rostov region, Novocherkassk, Prosveshcheniya st., 132
E-mail: d.v.dobrydnev@gmail.com

Improvement of the technology of the joint use of fuel and low-potential energy sources on the example of the heat and power complex

Abstract. The paper shows the results of studies of the efficiency of new combined heat pump cycles powered by an engine in comparison with existing heat pumps and boilers.

Key words: heat pump, heat transformer, energy complex, heat supply

Предлагается модернизация технологии применения тепловых насосов для получения теплоты и холода у конечного потребителя за счет использования органического топлива. Другими словами, предлагается «котел» (теплоэнергетический комплекс), использующий органическое топливо, как и аналоги, и дополнительно использующий низкопотенциальные источники энергии, за счет чего сокращается потребление топлива в 1,5-3 раза по сравнению с аналогами. Подробнее с технологией можно ознакомиться в [1].

Парокомпрессионный трансформатор теплоты (или тепловой насос) ПКТН использует механическую энергию для своей работы, она приводит в действие механический компрессор. Абсорбционный использует теплоту для своей работы и совокупность абсорбер/генератор в нем можно условно назвать «тепловой компрессор». Это обстоятельство позволяет использовать их комбинацию для привода от теплового двигателя, например, ДВС, где получаемая механическая энергия может использоваться в ПКТН, а тепловая (до температуры работы генератора пара) в АТН. Для повышения компактности конструкции и сокращения тепловых потерь предложено объединить ПКТН и АТН в один контур с единым испарителем. Такое объединение дает вариации включения механического и «теплого» компрессоров: последовательно, параллельно и смешано. В последовательном соединении есть возможность ставить вначале либо механический, либо «тепловой компрессоры», в параллельной схеме есть возможность организовать ее с общим конденсатором и отдельными. Такое комбинированное решение назвали новым трансформатором теплоты (НТТ). Для каждой вариации будут различные условия работы, эффективность и различное применение источника теплоты и механической энергии: только

тепловой двигатель, тепловой двигатель с котлом. Совокупность НТТ с источником энергии назвали теплоэнергетическим комплексом.

Цель данной работы – показать результаты исследования эффективности энергокомплекса на базе НТТ с котельным оборудованием и энергокомплексами на базе только АТН и только ПКТН. Расчеты и обоснования объемом 50 страниц сводятся к следующим результатам.

Последовательная схема НТТ. В последовательной схеме НТТ, в отличие от параллельной, идет жесткая привязка цикла АТН к ПКТН. Коэффициент преобразования нового трансформатора теплоты и коэффициент энергетической эффективности энергокомплекса на его основе привязаны к соотношению подводимых к ним энергий N/Q_g порядка $1/20$, что не может обеспечить тепловой двигатель и приходится вводить дополнительный источник теплоты. Для последовательной схемы в обоих случаях доля участия механической энергии (условного парокompрессионного контура) в разы меньше доли участия тепловой энергии (условного абсорбционного контура). Примечательно, что в обоих случаях максимальный коэффициент преобразования нового трансформатора теплоты достигается при соотношении прироста температур газа в условном парокompрессионном контуре – 30%, в условном абсорбционном контуре 70%, вне зависимости от порядка их включения. Так же примечательно, что в обоих случаях максимальный COP составляет около 1,7: для схемы «снизу ПКТН» – 1,681, для схемы «снизу АТН» – 1,726. Максимальное значение коэффициента энергетической эффективности энергокомплекса на базе нового трансформатора теплоты достигается при том же режиме 10ПТ25АТ60, при котором достигается и максимальный коэффициент трансформации нового трансформатора теплоты. Зависимость коэффициента энергетической эффективности энергокомплекса в случае с последовательной схемой нового трансформатора теплоты «снизу АТН» не имеет экстремумов, и максимальная эффективность достигается при уменьшении доли прироста температуры газа в условном парокompрессионном контуре.

Параллельная схема НТТ. Коэффициент преобразования при параллельной схеме тем выше, чем выше доля участия ПКТН, аналогично последовательной схеме («снизу ПКТН»). Однако, в отличие от последовательных схем данная схема позволяет работать новому трансформатору теплоты при любых соотношениях N/Q_g , что увеличивает область применения нового трансформатора теплоты и позволяет подбирать для его привода наиболее эффективные и независимые источники тепловой и механической энергии. Для энергокомплекса, аналогично, как и для НТТ характерно на эффективность влияет доля использования условного цикла ПКТН, которая достигается режимом работы ДВС: чем больше его механический КПД, тем выше доля ПКТН. Максимальное значение «К» достигается при максималь-

ном η_m , а затем снижается при его уменьшении. Уменьшение η_m может быть характерно при сниженных нагрузках ДВС, либо соответствующих типах и конструкциях теплового двигателя (ГТУ, двигатель Стирлинга и т.д.). Влияние режима условного АТН в параллельной схеме практически не ощутимо на общую эффективность энергокомплекса. Соответственно для повышения эффективности в первую очередь нужно влиять на η_m теплового двигателя и подбирать минимальный температурный прирост для условного ПКТН для решаемой задачи. При этом просто наличие условного АТН в параллельной схеме ощутимо положительно влияет на эффективность энергокомплекса. Если сравнить энергокомплекс с параллельной схемой 10ПТ60;10АТ60 (общий конденсатор, каждый условный контур поднимает температурный потенциал с 10 до 60 °С) и энергокомплекс только на базе ПКТН и только на базе АТН, при одинаковых $\eta_m = 35\%$, то: для 10ПТ60;10АТ60 $K=2,358$; для 10ПТ60 (только ПКТН) $K=1,99$; для 10АТ60 (только АТН) $K=1,65$.

Выводы. Эффективность последовательной схемы ниже, чем параллельной, поскольку в последовательной схеме соотношение механической и тепловой энергий задается циклом и не совпадает с соотношением теплового двигателя, поэтому невозможно полностью реализовать оптимально всю располагаемую энергию двигателя и приходится добавлять энергию котельной установки. При этом доля механической энергии очень низкая, а именно она и поднимает общую эффективность. Параллельная схема существенно эффективней последовательной, при этом позволяет, при нагреве теплоносителя до 60 °С экономить топливо по сравнению с котлом на том же топливе в 2,5 раза, по сравнению с энергокомплексом на базе только АТН в 1,43 раза по сравнению с энергокомплексом на базе только ПКТН в 1,2 раза. Если сравнивать экономию по сравнению с тепловым насосом, питаемым от электросети, что не совсем корректно, то экономия первичного топлива в условном выражении составит в 1,8 раз, а экономия денежных средств в зависимости от тарифа может составить в 3-5 раз.

Литература

1. Прототип тригенерационного теплоэнергетического комплекса / В.В. Папин, Р.В. Безуглов, Н.Н. Ефимов, А.А. Белов, А.С. Шмаков, Д.В. Добрыдnev // Изв. вузов. Электромеханика. 2022. Т. 65. № 3. С. 107-119. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2022-3-107-119>.

УДК 681.58

Ф.Р.САФИН зам. ген. директора по производству
Г.Ф. БАГАУТДИНОВА гл. инженер проекта

ОГКП «Корпорация развития коммунального комплекса Ульяновской области»
Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Урицкого, дом №35Б
e-mail: Gulnara73Bag@inbox.ru,
e-mail: fidel2009@yandex.ru

Передвижная блочно-модульная котельная в жилищно-коммунальном комплексе как инструмент бесперебойного обеспечения теплоснабжения социально значимых объектов во время аварийно-восстановительных работ

Аннотация. В статье описана мобильная передвижная блочно-модульная котельная предназначенная для кратковременного теплоснабжения потребителей во время аварийно-восстановительных работ основных источников и сетей теплоснабжения. Она устанавливается на шасси и с его помощью легко перемещается с места на место. По прочим характеристикам данный вид не отличается от остальных транспортабельных блочно-модульных аналогов. В холодное время года, когда аварии случаются особенно часто и могут повлечь за собой серьезные последствия – это особенно актуально.

Ключевые слова: мобильная котельная, теплоснабжение, бесперебойное теплоснабжение, передвижная котельная, теплообеспечение

F.R. SAFIN Deputy gene. production director
G.F. BAGAUTDINOV Ch. project engineer

OGKP "Corporation for the development of the municipal complex
of the Ulyanovsk region"
Russia, 432071, Ulyanovsk, st. Uritskogo, 35B
e-mail: Gulnara73Bag@inbox.ru, e-mail: fidel2009@yandex.ru

Mobile block-modular boiler room in housing and utility complex as a tool of uninterrupted heat supply to socially significant objects during emergency and recovery work

Abstract. The article describes a mobile mobile block-modular boiler house designed for short-term heat supply to consumers during emergency recovery work of the main sources and heat supply networks. It is installed on the chassis and with its help it is easy to move from place to place. According to other characteristics, this type does not differ from other transportable block-modular analogues. In the cold season, when accidents happen especially often and can lead to serious consequences, this is especially true.

Key words: mobile boiler house, heat supply, uninterrupted heat supply, mobile boiler house, heat supply.

Мобильная котельная установка позволяет в экстренном порядке восстановить подачу отопления и горячей воды на объект при возникновении аварийной ситуации на основной теплотрассе или выходе из

строая стационарной теплоснабжающей установки.

Развернуть и запустить котельную возможно в кратчайшие сроки (на транспортировку и подключение может понадобиться от 1 до 2 часов). Мобильная котельная установка позволяет поддерживать нужную температуру в здании и недопускать простоев в работе. Бесперебойное теплообеспечение временных населенных пунктов, например, рабочих поселков. На шасси может устанавливаться котельная достаточной мощности для обеспечения теплом и ГВС целого микрорайона города. По окончании вахты или работ на данном объекте передвижная котельная легко перевозится на новое место.

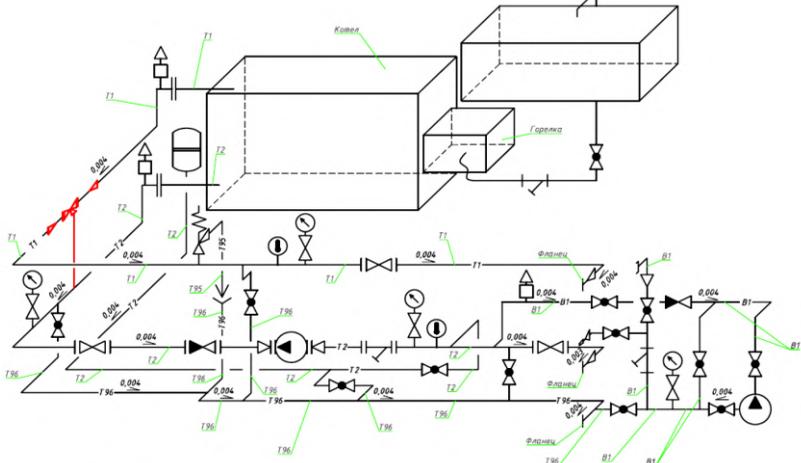
Такой мощностью котельная, например, может временно обеспечить теплом помещения площадью до 4000 м², это как сельскую школу и дом культуры, либо несколько многоквартирных домов.

Так как на шасси размещается блок-бокс, изготовленный аналогично корпусу отдельно стоящей котельной, мобильная установка сохраняет работоспособность вне зависимости от погодных условий и температуры окружающего воздуха. А наличие встроенного энергогенератора обеспечивает автономию от сетей энергоснабжения.

Котельная работает на дизельном топливе, установленной мощностью 0,4 МВт, с температурным графиком: 95/70 °С. В котельной предусмотрена установка водогрейного водотрубного котла с автоматической дизельной двухступенчатой горелкой. Для циркуляции теплоносителя установлен сетевой насос. Для компенсации температурных расширений предусмотрен мембранный расширительный бак, подключенный к обратному трубопроводу до сетевого насоса. На подающем трубопроводе для защиты системы от превышения давления предусмотрен предохранительный клапан с возможностью ручного открывания. Удаление продуктов сгорания предусмотрено через съемную дымовую трубу. Вентиляция котельной приточно-вытяжная, естественная, запроектирована из расчета 3-х кратного воздухообмена с учетом подачи воздуха на горение топлива в котле и дизельгенераторе. Вытяжка - за счет проектируемой вытяжной решетки, приток - за счет проектируемой приточной решетки.

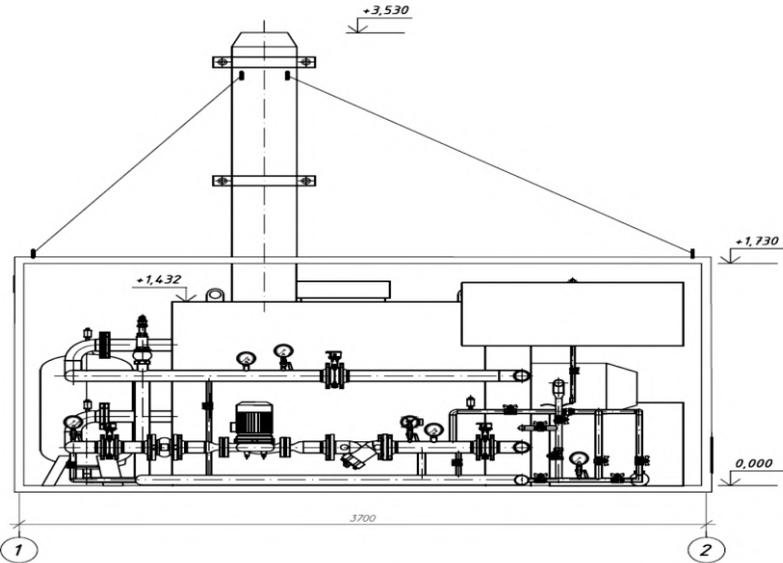
Для автономного электроснабжения котельной предусмотрен дизельный электрогенератор. Конструкция котельной предполагает использование дизельного электрогенератора на открытом воздухе, на специальной подставке. Подача топлива предусмотрена из автомобильного топливного бака, установленного под потолком в котельную. Подключение тепловых сетей к котельной осуществляется через резиновые напорные армированные рукава. Для подключения подпиточного трубопровода теплосети предусмотрены два вывода из котельной: штуцер для подключения шланга (подключение обратного трубопровода теплосети к питьевому водопроводу) и трубопровод со специальной соединительной головкой для подключения к противопожарному водопроводу.

Аксонметрическая схема трубопроводов котельной



Условные обозначения

- T1 — подающий трубопровод теплотрассы
- T2 — обратный трубопровод теплотрассы
- T95 — напорный дренажный трубопровод
- T96 — безнапорный дренажный трубопровод
- B1 — трубопровод подпиточной воды
- 0,002 — направление и величина уклона трубопровода



Для подпитки теплосети предусмотрен подпиточный насос. Для слива теплоносителя из котельной, а также для сброса избыточного давления теплосети предусмотрена водоотводящая труба через резиновый напорный армированный, на одном конце которого закреплен при помощи червячных хомутов соединительный патрубок.

Передвижная котельная выделяются среди своих аналогов, тем что:

- За счет установки на шасси обладают повышенной мобильностью;
- Ее работоспособность не зависит от внешних климатических условий;
- Абсолютно не зависят от централизованных инженерных сетей (благодаря этому мобильная котельная может работать там, где любой другой вид подобного оборудования будет бесполезен);
- Высокая степень автоматизации всех рабочих процессов облегчает эксплуатацию;
- Высокая эффективность работы при низких затратах делает ее экономически выгодной;
- Не требует существенных финансовых расходов на строительство и запуск.

Передвижная котельная в стандартной комплектации отличается от других видов транспортабельных блочно-модульных котельных лишь наличием топливной емкости, обеспечивающей установку запасом горючего, и генератора, вырабатывающего электроэнергию. Присоединение к трассам коммуникаций осуществляется с помощью гибких труб, входящих в состав оборудования и перевозимых внутри контейнера. Такая котельная необходима для организаций, эксплуатирующих большое количество теплоисточников.

Литература

1. СП 373.1325800.2018 Источники теплоснабжения автономные. Правила проектирования
2. СП 62.13330.2011* Газораспределительные системы. Актуализированная редакция СНиП 42-01-2002 (с Изменениями N 1, 2, 3, 4)
3. СП 89.13330.2016 Котельные установки. Актуализированная редакция СНиП II-35-76 (с Изменением N 1)
4. СП 41-104-2000 Проектирование автономных источников теплоснабжения
5. ФЗ №209 от 21 июля 2014г «О ГИС ЖКХ»
6. «Жилищный кодекс РФ» от 29.12.2004 №188-ФЗ

УДК 620.91

А.В. ФЕДЮХИН, к.т.н.,
Д.В. СЕМИН, аспирант
С.А. ДРОНОВ, аспирант
А.Г. ГУСЕНКО, студент

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, г. Москва, Вн.тер.г. муниципальный округ Лефортово,
ул. Красноказарменная, д.14, стр.1.
E-mail: FedyukhinAV@yandex.ru

Разработка тепловых схем воздухо-аккумулирующих электростанций

Аннотация. В работе предложена классификация воздухо-аккумулирующих электростанций (ВАЭС), выполнено моделирование приоритетных тепловых схем, описаны технические предпосылки для создания отечественной ВАЭС.

Ключевые слова: воздухо-аккумулирующая электростанция, аккумулярование энергии, возобновляемые источники энергии.

A.V. FEDYUKHIN, PhD,
D.V. SEMIN, PhD students
S.A. DRONOV, PhD students,
A.G. GUSENKO, student

National Research University «MPEI»
111250, Krasnokazarmennaya 14, build. 1, Moscow, 111250, Russia
E-mail: FedyukhinAV@yandex.ru

Development of compressed air energy storages thermal schemes

Аннотация. The article proposes a classification of compressed air energy storages (CAES), modeling of priority thermal schemes was performed, technical prerequisites for the creation of a domestic CAES were described.

Key words: compressed air energy storages, energy storage, renewable energy sources.

ВАЭС подразделяются на диабатические (Д-ВАЭС), адиабатические (А-ВАЭС) и изотермические циклы (И-ВАЭС). В диабатическом цикле, тепловая энергия, образующаяся в результате сжатия воздуха, отводится в окружающую среду [1]. В адиабатических тепловая энергия сжатия сохраняется в дополнительных специальных устройствах – накопителях тепловой энергии (НТЭ). Накопленная тепловая энергия используется при расширении, тем самым исключив потребность во внешних источниках в период разрядки воздушного аккумулятора. Кроме того, существуют концепции и без использования НТЭ. В отличие от Д-ВАЭС и А-ВАЭС, в И-ВАЭС образование тепловой энергии при сжатии должно быть сведено к минимуму, либо отсутствовать.

В качестве прототипа схемы Д-ВАЭС большой мощности (от нескольких десятков до нескольких сотен МВт) для условий Российской Федерации (ОЭС Центра и ОЭС Юга) может быть рассмотрена установка по американскому проекту NYSEG SENECA [2].

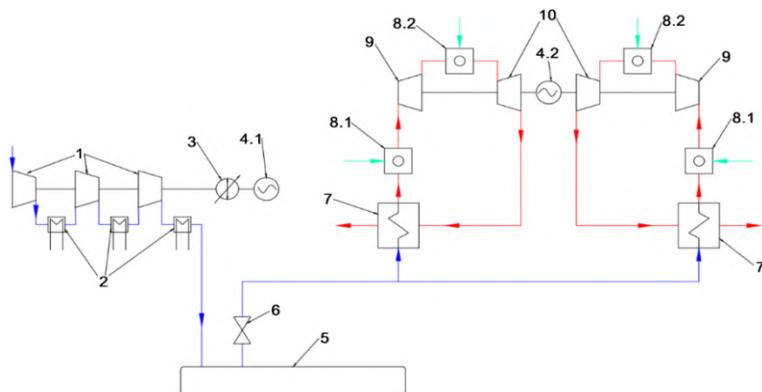


Рис. 1. Технологическая схема Д-ВАЭС:

- 1 – компрессоры, 2 – охладители воздуха, 3 – регулируемая гидромурфта,
- 4.1 – электродвигатель, 4.2 – электрогенератор, 5 – хранилище сжатого воздуха,
- 6 – дроссель, 7 – рекуператор, 8.1 – камера сгорания высокого давления,
- 8.2 – камера сгорания низкого давления, 9 – турбина высокого давления,
- 10 – турбина низкого давления

Прототипом А-ВАЭС (от нескольких МВт до нескольких десятков МВт) может служить установка, разработанная специалистами Китайской Академии Наук [3]. Особенностью тепловой схемы является применение контура с промежуточным теплоносителем (минеральное масло) для рекуперации тепловой энергии между блоками сжатия и расширения (рис. 2).

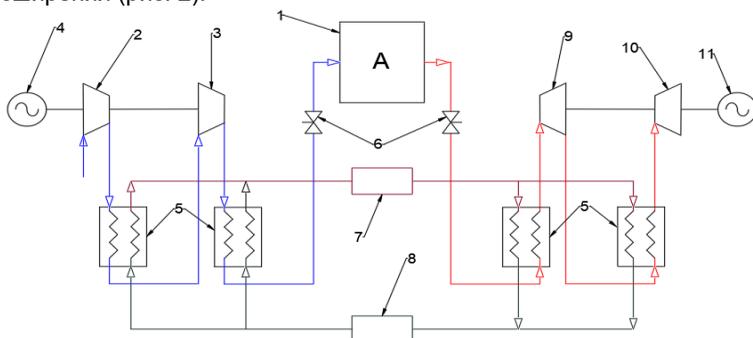


Рис. 2. Технологическая схема А-ВАЭС: 1 – аккумулятор сжатого воздуха, 2 – компрессор высокого давления, 3 – компрессор низкого давления, 4 – электродвигатель, 5 – теплообменник, 6 – дроссель, 7 –, 8 – бак холодного теплоносителя, 9 – турбина высокого давления, 10 – турбина низкого давления, 11 – электрогенератор

Коллективом выполнено моделирование тепловых схем приоритетных ВАЭС в среде Aspen HYSYS: SENECA, ВАЭС United Technologies, ВАГТЭ Матагорда и др. По итогам моделирования были определены ключевые параметры, среди которых: суммарная мощность компрессоров, расход воздуха через компрессоры, расчетный объем хранилища, расчетная температура в хранилище, максимальное давление в хранилище, суммарная мощность турбин, расход рабочего тела через одну турбину высокого давления, расход рабочего тела через одну турбину низкого давления, давление воздуха перед турбиной высокого давления, давление воздуха перед турбиной низкого давления, период полной зарядки/разрядки, суммарный расход природного газа, температура уходящих газов, КПД по отпуску электроэнергии.

В условиях санкционных ограничений важнейшим вопросом является доступность оборудования в Российской Федерации. Технологическая схема ВАЭС включает в себя следующие крупные узлы: компрессоры, турбины, теплообменники, электродвигатели/генераторы. Номинально в стране имеются производители перечисленных узлов: АО «Уральский турбинный завод», АО «Силовые машины» (турбины высокого и низкого давления); АО «Казанькомпрессормаш», АО «РЭП Холдинг» (компрессоры высокого, среднего и низкого давлений); Концерн «Русэлпром», НПО ПАО «Элсиб» (электродвигатели и генераторы); АО «Борхиммаш», ООО «Термо Северный Поток» (рекуператоры, промежуточные и концевые охладители). В то же время для строительства первой крупной российской ВАЭС потребуются проведение ряда НИОКР (в частности, по разработке воздушных турбин на базе компетенций в проектировании паровых турбин высокого давления) и оптимизация схемы с учетом имеющихся возможностей серийного производства (к примеру, максимальная производительность компрессоров, выпускаемых АО «Казанькомпрессормаш» не превышает 1500 м³/мин, что при адаптации схемы SENECA потребует проектирования нескольких линий нагнетания параллельно для обеспечения требуемого расхода воздуха – 13 000 м³/мин). Таким образом, ВАЭС мощностью 50 – 250 МВт может быть создана с учетом компетенций российской промышленности при проведении комплекса целевых НИОКР.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No. 22-29-00700, <https://rscf.ru/project/22-29-00700/>.

Литература

1. Г.Г. Ольховский, В.А. Казарян, А.Я. Столяревский // Воздушно-аккумулирующие газотурбинные электростанции (ВАГТЭ) – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2011. – 358 с.
2. NYSEG SENECA // Compressed air energy storage (CAES) demonstration project, Final Phase 1 Technical Report. September 2012. – 66 P.
3. L. Chen, Y. Wang, M. Xie, K. Ye, S. Mohtaram // Energy and exergy analysis of two modified adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) system for cogeneration of power and cooling on the base of volatile fluid // Journal of Energy Storage. – 2021. – №42. 103009.

УДК 621.311.24:621.313.12

А.В. КОНОВАЛОВ, к.т.н
Н.А. ФРАНТОВ студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново ул. Рабфаковская 34
E-mail: anatoliy.v.konovалov@mail.ru, nikitafrantov@mail.ru

Моделирование сушильной камеры для сушки древесины

Аннотация: данная работа посвящена моделированию конвективной камеры для сушки древесины с рециркуляцией. А именно статье будут рассмотрены методики расчеты коэффициента теплоотдачи на внутренней и наружной поверхности стенок камеры для их дальнейшего использования при моделировании.

Ключевые слова: коэффициент теплоотдачи, критериальные уравнения, сушка древесины, определяющие параметры.

A.V. KONOVALOV, PhD.
N.A. FRANTOV student

Ivanovo State Power University
34, Rabfakovskaya st., 153003, Ivanovo
E-mail: anatoliy.v.konovалov@mail.ru, nikitafrantov@mail.ru

Modeling a drying chamber for wood drying

Abstract. this work is devoted to modeling a convective chamber for drying wood with recirculation. Namely, the article will consider methods for calculating the heat transfer coefficient on the inner and outer surfaces of the chamber walls for their further use in modeling.

Key words: heat transfer coefficient, criterion equations, wood drying, defining parameters.

Сушильная разработана и смонтирована мной в производственном помещении. Объем высушиваемого материала составляет 3,5 м³. В качестве источника теплоты используется дизельный котел Kiturami Turbo 13R. Агентом сушки является горячий воздух. Для его правильной циркуляции и нагрева используется тепловентилятор VOLCANO VR MINI AC. Производительность сушильной камеры составляет 14 м³ в месяц

Разработка данной сушильной камеры актуальна для небольших цехов и предприятий, так как она значительно дешевле промышленных сушильных камер и может применяться практически в любых производственных цехах за счет своих малых габаритов.

Расчет коэффициентов теплоотдачи необходим для составления дальнейшей модели в программном комплексе COSMOL MULTIFITHICS. А именно, в ходе дальнейшего изучения этой темы

планируется составить модель теплопередачи через стенку сушильной камеры для изучения распределения температурных полей и расчета теплотерь. Схема стенки изображена на рис. 1.

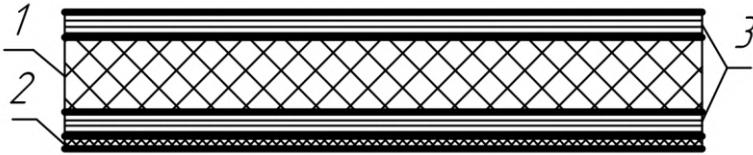


Рис.1. Схема стенки сушильной камеры

1 – пенополистирол экструдированный; 2 – полиэтилен вспененный;
3 – OSB-плита

Полученные данные будут использоваться для составления температурного баланса сушильной камеры и на основании этого будет производиться настройка дизельного котла и тепловентилятора согласно режимам сушки пиломатериала [3].

Данные для расчетной модели будут взяты на основе экспериментальных измерений в ходе эксплуатации сушильной камеры.

На наружной стенке сушильной камеры происходит теплоотдача при свободной конвекции. Для расчета коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности стенки будем использовать критериальную формулу М.А. Михеева теплоотдачи при свободной конвекции около вертикальных пластин [1].

Критерий Нуссельта определяется по формуле:

$$Nu_1 = C \times Ra^n \quad (1)$$

где C , n – коэффициенты зависящие от критерия Релея [1].

$$Ra = Pr \cdot Gr \quad (2)$$

Критерий Прандтля и все теплофизические параметры окружающего воздуха берутся при определяющей температуре.

Критерий Грасгофа рассчитывается по формуле

$$Gr = \frac{g \times R_0^3}{\nu^2} \times \beta \times \Delta t \quad (3)$$

где ν - коэффициент кинематической вязкости, m^2/c ; β - коэффициент объемного расширения, $^{\circ}C^{-1}$; Δt - модуль разности температур между стенкой и флюидом, $^{\circ}C$

Определяющие параметры:

$t_0 = 0,5 \cdot (t_f + t_w)$ - средняя температура пограничного слоя, где t_f - согласно [2] для деревообрабатывающих цехов; t_w - температура наруж-

ной стенки сушильной камеры взята из эксперимента.

$R_0 = \min(a, b)$ - определяющий размер, где a и b – размеры прямоугольной пластины, а именно размеры расчетной области стенки камеры. При этом в зависимости от расположения теплоотдающей (теплопринимающей) поверхности коэффициент теплоотдачи либо увеличивают на 30 %, либо уменьшают на 30%.

Коэффициент теплоотдачи от наружной стенки к окружающему воздуху рассчитывается по формуле.

$$a_1 = \frac{Nu_1 \times \lambda_{f1}}{R_0} \quad (4)$$

где λ_f - коэффициент теплоотдачи окружающего воздуха, Вт/(м×°С) .

Далее рассмотрим методику расчета коэффициента теплоотдачи от горячего воздуха к внутренней поверхности стенки сушильной камеры. Параметры горячего воздуха возьмем при III режиме [2] сушки пиломатериала, которые измерены в процессе эксплуатации сушильной камеры.

В данном случае будет вынужденная конвекция при обтекании пластины [4].

Определим критерий Рейнольдса по формуле:

$$Re_2 = \frac{w_0 \times R_0}{\nu_2} \quad (5)$$

где w_0 - скорость движения горячего воздуха внутри сушильной камеры, м/с.

При ламинарном режиме течения флюида критерий Нуссельта рассчитывается по формуле ($Re_2 \leq 5 \times 10^5$):

$$Nu_2 = 0,69 \times Re_2^{0,5} \times Pr_f^{1/3} \times (Pr_f / Pr_w)^{0,25} \quad (6)$$

где Pr_f - критерий Прандтля при температуре горячего воздуха (флюида); Pr_w - критерий Прандтля при температуре внутренней стенки сушильной камеры.

При турбулентном режиме течения флюида критерий Нуссельта рассчитывается по формуле $Re \geq 5 \cdot 10^5$:

$$Nu_2 = 0,037 \times Re_2^{0,8} \times Pr_f^{0,43} \times (Pr_f / Pr_w)^{0,25} \quad (7)$$

Определяющие параметры: $t_0 = t_f$ - температура текучей среды за пределами теплового пограничного слоя, взятая из экспериментальных измерений при III режиме сушки; $R_0 = L$ - длина пластины; w_0 - скорость невозмущенного потока (за пределами гидродинамического пограничного слоя)

Коэффициент теплоотдачи от горячего воздуха к внутренней поверхности стенки сушильной камеры.

$$a_2 = \frac{Nu_2 \times \lambda_{12}}{R_0} \quad (8)$$

Вывод: полученные данные позволяют корректно составить модель стенки сушильной камеры для исследования распределения температурных полей и расчета теплопотерь. Из анализа распределения температурных полей появится возможность определения области выпадения конденсата и последующее решение проблемы путем добавления пароизоляции. Правильный расчет количества теплопотерь необходим для составления теплового баланса сушильной камеры и в дальнейшем для правильной эксплуатации дизельного котла и теплоventильатора.

Литература

1. Бухмиров В. В. Тепломассообмен: Учеб. пособие / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина» - Иваново, 2014. – 360 с.
2. Соколов П.В. Сушка древесины – Москва: Гослесбумиздат, 1955. – 423 с.
3. Лебедев П. Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки. Учебник для студентов технических вузов. Изд. 2-е, перераб. М., «Энергия», 1972. – 320 с.

УДК 620.92

А.С. ШМАКОВ аспирант,
В.В. ПАПИН, к.т.н., доцент,
Р.В. БЕЗУГЛОВ, к.т.н., доцент,
Д.В. ДОБРЫДНЕВ аспирант,
Н.А. ВЕДМИЧЕВ, аспирант.

Южно-Российский государственный политехнический университет
имени М.И. Платова
346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск,
ул. Просвещения, 132
E-mail: shmakov_as@nptu.ru

Текущее состояние исследования энергокомплекса

Аннотация. В данной работе представлен энергокомплекс и основные полученные результаты эффективности, полученные в результате теоретических и экспериментальных исследованиях.

Ключевые слова: теплоснабжение, парокompрессионный тепловой насос, абсорбционный тепловой насос, возобновляемые источники энергии.

A.S. SHMAKOV graduate student,
R. V. BEZUGLOV, PhD, associate professor,
V. V. PAPIN, PhD, associate professor,
D.V. DOBRIDNEV, graduate student,
N. A. VEDMICHEV, graduate student.

Platov South Russian State Polytechnic University
346428, Rostov region, Novocherkassk,
Prosveshcheniya st., 132
E-mail: shmakov_as@npi-tu.ru

Current state of the energy complex research

Abstract. This paper presents the energy complex and the main efficiency results obtained as a result of theoretical and experimental studies.

Key words: heat supply, steam compressor heat pump, absorption heat pump, renewable energy sources.

В рамках работ по разработке технологий применения вторичных и возобновляемых низкопотенциальных источников энергии для повышения энергетической эффективности и экологических показателей при производстве теплоты и холода с использованием органического топлива был спроектирован и изготовлен прототип энергокомплекса, представленный на рис. 1–2.

Энергокомплекс состоит из трех основных элементов – это двигатель внутреннего сгорания, абсорбционный и парокompрессионный тепловые насосы. Принцип действия основывается на выработке тепловым двигателем механической и тепловой энергии. Механическая энергия будет передана парокompрессионному тепловому насосу, а тепловая – абсорбционному. Трансформаторы теплоты будут работать от одного теплового двигателя, при этом с учетом коэффициентов преобразования значительная часть тепловой энергии будет браться из окружающей среды. Вся получившаяся тепловая энергия будет передана потребителю.

При разработке технологий была сформирована теория Папиным Владимиром Владимировичем, основывающаяся на параллельном, смешанном и последовательном включении концентраторов теплоты. Представленный энергокомплекс использует параллельную схему включения концентраторов теплоты и является отдельным, упрощенным вариантом нового трансформатора теплоты. Он был изготовлен для проверки правильности изложенной теории.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования прототипа. При сравнении исследований было установлено, что коэффициент энергетической эффективности в теоретическом исследовании составил 1,206, а в проведенном испытании 1,19. Относительное отклонение от расчетных значений составило 1%, что подтверждает правильность теоретических исследований. Методика расчета и основные

результаты, полученные при проведении исследований прототипа представлены в трудах [1]. В качестве двигателя внутреннего сгорания был использован дизельный двигатель. При сравнении прототипа энергокомплекса и дизельного котла было установлено, что энергетическая эффективность прототипа энергокомплекса на 30% выше чем у дизельного котла.

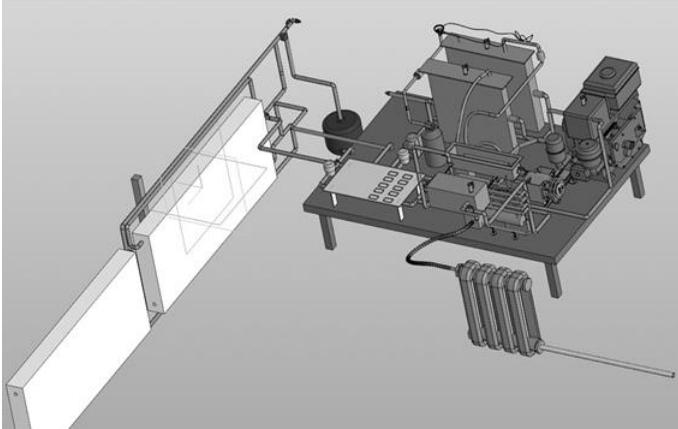


Рис. 1. 3D модель прототипа энергокомплекса

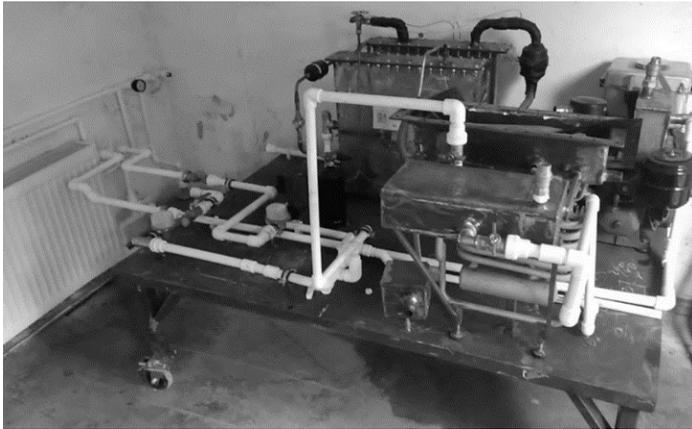


Рис. 2. Прототип теплогенератора повышенной эффективности

Вывод. Изготовлен прототип энергокомплекса, проведены его теоретические и экспериментальные исследования, по результатам кото-

рого было выявлено, что эффективность прототипа превышает на 30 % эффективность котла, работающего на том же виде топлива (дизельное топливо). Другими словами, предлагаемое нами устройство, работая аналогично котлу на 30% потребляет топлива меньше чем котел, за счет использования низкопотенциальных источников энергии.

Литература

1. Прототип тригенерационного теплоэнергетического комплекса / В.В. Папин, Р.В. Безуглов, Н.Н. Ефимов, А.А. Белов, А.С. Шмаков, Д.В. Добрыднев // Изв. вузов. Электромеханика. 2022. Т. 65. № 3. С. 107-119.
<https://doi.org/10.17213/0136-3360-2022-3-107-119>.

УДК 620.9:622.92:658.264

А.В.КОНОВАЛОВ, к.т.н.,
В.О.ПОТЕМКИНА, магистрант,
В.В. СЕННИКОВ, к.т.н.,
В.В. СМИРНОВ, к.т.н.,
А.И. ТИХОНОВ, д.т.н.

²Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфakovская, 34
E-mail: sennikov11@mail.ru

Диагностика режима работы системы отопления здания

Аннотация. Диагностика режима работы системы теплоснабжения, анализ режима с выявлением недостатков, качественный, надежный и экономичный режим.

Ключевые слова: диагностика режима, система отопления, наладка режима, экономичность.

A.V. KONOVALOV, Ph.D.,
V.O. POTEMKINA, undergraduate,
V.V. SENNIKOV, Ph.D.,
V.V. SMIRNOV, Ph.D.,
A.I. TIKHONOV, Doctor of Technical Sciences

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: sennikov11@mail.ru

Abstract. Diagnostics of the operating mode of the heat supply system, analysis of the mode with the identification of shortcomings, high-quality, reliable and economical mode.

Key words: mode diagnostics, heating system, mode adjustment, efficiency.

Диагностика режима работы системы теплоснабжения включает в себе анализ режима с выявлением возможных недостатков, не позво-

ляющих организовать качественный, надежный и экономичный режим работы системы теплоснабжения. Выявив недостатки, на следующем этапе необходимо предложить мероприятия по наладке режима работы системы наиболее экономичным способом.

Объект исследования: жилой дом, система теплоснабжения – двухтрубная зависимая, непосредственная; температурный график –95/70 С; наружная температура – минус 8,7 С, температура воды в подающем трубопроводе – 63,95 С, в обратном – 48,7 С; расход воды – 17,96 т/ч; максимальная тепловая нагрузка – 0,468 Гкал/ч.

По [1] при текущем значении наружного воздуха получаем значение относительной тепловой нагрузки системы отопления $\overline{Q}_{op} = 0,543$, при относительном расходе теплоносителя $\overline{G}_o = 0,89$, и внутренней температуре воздуха в здании $16,81^\circ\text{C}$, при этом расход теплоносителя оценивается не по показаниям расходомера, а по приближенной методике:

$$\overline{G}_o = \overline{Q}_o^{0,2},$$

Объясним значение $\overline{Q}_{op} = 0,564$ и $t_{вп} = 16,81^\circ\text{C}$.

Относительный расход теплоносителя:

$$\overline{G}_o = \overline{Q}_o^{0,2} = 0,543^{0,2} = 0,885.$$

Расход воды расчетный:

$$\overline{G}_p = \frac{Q_{o\max}}{(\tau_1 - \tau_2)_p} = \frac{0,4698}{95 - 70} \cdot 10^3 = 18,79 \text{ т/ч}.$$

Текущий расход теплоносителя

$$G_i = \overline{G}_o \cdot G_p = 0,885 \cdot 18,79 = 16,59 \text{ т/ч}$$

Относительная тепловая нагрузка (по уравнению теплового баланса)

$$\overline{Q}_o = \frac{G_i \cdot (\tau_1 - \tau_2)}{Q_{o\max}} = \frac{16,59 \cdot (63,95 - 48,7)}{0,4698} = 0,540 \approx 0,543$$

Внутренняя температура воздуха

$$t_b = 0,540 \cdot (18 - (-29)) + (-8,7) = 16,7 \approx 16,81^\circ\text{C}.$$

Качество режима работы системы отопления определяется по значению температуры внутреннего воздуха, которая в свою очередь зависит от \overline{Q}_o при текущей температуре наружного воздуха.

В тоже время относительная тепловая нагрузка на отопление по данным узла учета равна

$$\overline{Q}_o = \frac{\frac{63,95 + 48,7}{2} - (-8,7)}{\frac{95 + 70}{2} - (-29)} = 0,583$$

и внутренняя температура воздуха

$$t_b = 0,583 \cdot (18 - (-29)) + (-8,7) = 18,71 \approx 16,81^\circ \text{C}.$$

Итак, методики оценки качества отопления – одна с использованием показаний расходомеров узла учета, другая – при оценке величины расхода воды по приближенной методике, дают разные результаты. В первом случае наладка режима не требуется, во втором – необходима.

Оценим качество наладки при использовании методики [1]. Качество теплоснабжения здания можно достигнуть 2 способами при текущем значении температуры наружного воздуха:

1. Подняв температуру в подающем трубопроводе до значения соответствующей температурному графику. Получаем: $\overline{Q}_o = 0,56$ и $t_b = 17,64^\circ \text{C} \approx 18^\circ \text{C}$ том же расходе $\overline{G}_o = 0,89$.

2. При текущей температуре в подающем трубопроводе за счет увеличения расхода воды поднимаем температуру в обратном трубопроводе до значения согласно температурному графику. При этом расход теплоносителя необходимо увеличить с $G_o = 0,89$ до $\overline{G}_o = 1,155$, т.е. почти на треть. При этом увеличится $\overline{Q}_o = 0,588$ и $t_b = 17,64^\circ \text{C} \approx 18^\circ \text{C}$.

Вывод. Широко применяемый в настоящее время на практике метод наладки теплогидравлического режима работы системы теплоснабжения путем подъема температуры в обратном трубопроводе до расчетного значения по температурному графику за счет увеличения расхода теплоносителя относится к затратным, наименее экономичным способам. При этом, локальная регулировка режима у одного потребителя может привести к необходимости проведения наладочных работ у всех остальных потребителей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-48-370001 р_а_Ивановская область, договор от 13.01.2021.

Литература

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. Издательство МЭИ. Москва. 2001. 472 с.

УДК 620.9

А.В. КОНОВАЛОВ, к.т.н.,
С.В. КОСЯКОВ, д.т.н.,
В.В. СМIRНОВ, к.т.н.,
В.В. СЕННИКОВ, к.т.н.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: sennikov11@mail.ru; ksv@mail.ru

Экспресс-аудит системы отопления здания

Аннотация. Приводится методика экспресс-аудита системы отопления с использованием данных узла учета теплового пункта здания: определяются фактические значения максимальной тепловой нагрузки на отопление и температуры внутреннего воздуха.

Ключевые слова: экспресс-аудит, узел учета, относительная тепловая нагрузка, максимальная тепловая нагрузка на отопление, внутренняя температура воздуха.

A.V. KONOVALOV, Ph.D.,
S.V. KOSYAKOV, Doctor of Technical Sciences,
V.V. SENNIKOV V.V., Ph.D.,
V.V. SMIRNOV, Ph.D.

Ivanovo State Power University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: sennikov11@mail.ru; ksv@mail.ru

Express audit of the building heating system

Abstract: The method of express-audit of the heating system using the data of the metering unit of the heating point of the building is given: the actual values of the maximum heat load on heating and the temperature of the internal air are determined.

Key words: express audit, metering unit, relative heat load, maximum heat load on heating, internal air temperature.

При качественной работе системы отопления здание должно получать тепловую энергию в количестве не менее договорной нагрузки с целью создания и поддержания внутренней температуры воздуха в допустимых пределах (18-24 С).

Значение внутренней температуры в помещениях здания зависит от величины относительной тепловой нагрузки на отопление \bar{Q}_0 , где

$$\bar{Q}_0 = \frac{Q_{oi}}{Q_{omax}}$$

При этом текущее значение тепловой нагрузки на отопление при наличии узла учета в ИТП здания определяется по уравнениям теплового баланса и теплопередачи, а максимальная тепловая нагрузка

ка здания на отопление – по выражению [1];

$$Q_{0\max} = kF_{\text{зд}} \cdot \left(\frac{\tau_1 + \tau_2}{2} - t_{\text{н}} \right)_p$$

Здесь $kF_{\text{зд}}$ – тепловой параметр здания, который характеризует эффективность работы системы отопления и теплозащиты ограждающих конструкций здания. В течение отопительного периода тепловой параметр здания есть величина постоянная (отклонение от среднего значения по данным узла учета составляет 3–4 %).

Объект исследования: жилой дом, температурный график –95/70 С; наружная температура – минус 8,7 С, температура воды в подающем трубопроводе – 63,95 С, в обратном – 48,7 С; расход воды – 17,96 т/ч; текущая тепловая нагрузка – 0,274 Гкал/ч.

Методика экспресс-аудита системы отопления здания заключается в определении максимальной тепловой нагрузки здания и температуры внутреннего воздуха.

Тепловой параметр здания

$$kF_{\text{зд}} = \frac{Q_{0i}}{\left(\frac{\tau_1 + \tau_2}{2} - t_{\text{н}} \right)_i} = \frac{0,274 \cdot 10^3}{\left(\frac{63,95 + 48,7}{2} + 8,7 \right)} = 0,0042.$$

Максимальная тепловая нагрузка

$$Q_{0\max} = 0,0042 \cdot \left(\frac{95 + 70}{2} + 29 \right) = 0,468 \text{ Гкал/ч}$$

Полученное значение фактической нагрузки здания на отопление отличается от принятой в договоре на теплоснабжение отопительной нагрузки (0,3574 Гкал/ч).

Относительную тепловую нагрузку на отопление здания можно определить:

– по уравнению теплового баланса

$$\frac{Q_o}{Q_{o\max}} = \frac{G_i \cdot (\tau_1 - \tau_2)}{Q_{o\max}} = \frac{17,96 \cdot (63,95 - 48,7)}{0,4698} = 0,583,$$

– по уравнению теплопередачи

$$\frac{Q_o}{Q_{o\max}} = \frac{\left(\frac{\tau_1 + \tau_2}{2} - t_{\text{н}} \right)_i}{\left(\frac{\tau_1 + \tau_2}{2} - t_{\text{н}} \right)_p} = \frac{\frac{63,95 + 48,7}{2} - (-8,7)}{\frac{95 + 70}{2} - (-29)} = 0,583$$

Температура внутреннего воздуха с использованием относительной тепловой нагрузки определяется по выражению [2]:

$$t_{\text{в}} = 0,583 \cdot (18 - (-29)) + (-8,7) = 18,71^\circ\text{С}$$

Выводы. Приведенная выше методика позволяет, используя данные узла учета теплового пункта здания, оперативно уточнить максимальную тепловую нагрузку здания на отопление и оценить качество

предоставляемых услуг.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-48-370001 р_а_Ивановская область, договор от 13.01.2021.

Литература

1. В.Л. Гудзюк, С.В. Косяков, В.В. Сенников. Метод уточнения нагрузок в системах теплоснабжения на основе анализа данных учета потребления тепловой энергии. Вестник ИГЭУ, 2022 г. выпуск 6, с. 69-76.
2. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. Издательство МЭИ. Москва. 2001. 472 с.

УДК 621.6.022

И.А. БУДАНОВ, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: budanov123456789@gmail.com

О применении теплового насоса для подогрева поливочной воды

Аннотация. Приведен способ организации предварительного подогрева поливочной воды путем подключения системы капельного орошения к теплому насосу.

Ключевые слова: тепловой насос, капельное орошение.

I.A. BUDANOV, student

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: budanov123456789@gmail.com

About the use of a heat pump for heating irrigation water

Abstract: A method for organizing preheating of irrigation water by connecting a drip irrigation system to a heat pump is given.

Key words: heat pump, drip irrigation.

К середине 21 ожидаемая численность населения планеты Земля достигнет 10 миллиардов человек. Пропорционально численности населения возрастают и его потребности, в первую очередь, в продовольствии. Добиться увеличения производства сельскохозяйственной продукции можно принципиально двумя способами: увеличить количество обрабатываемых площадей, либо увеличить продуктивность уже занятых агропромышленностью территорий. Большая часть зе-

мель, пригодных для выращивания пищи, уже используется, следовательно, необходимо отталкиваться от имеющихся ресурсов и повышать эффективность их использования. Одним из способов повышения урожайности культур является подогрев поливочной воды. Положительное влияние теплой воды на метаболическую активность растений было доказано в 2007 году группой исследователей, возглавляемой Лори Р. Толли-Джордан. В ходе эксперимента было доказано, что более теплая вода способствует возникновению репродуктивных структур. Кроме того, поливочная вода низкой температуры препятствует развитию почвенной биоты, которая упрощает усвоение растениями сложнорастворимых соединений. Для тепличных хозяйств, полив теплой водой положительно скажется на сроке плодоношения и общем микроклимате теплицы.

В данной работе рассматривается подогрев поливочной воды в конденсаторе теплового насоса. Расчет будет произведен для тепловых насосов марки Eco Touch, работающих на хладагенте R410-A. Тепловой насос состоит из четырёх основных функциональных элементов: испарителя, компрессора, конденсатора и дросселя, по которым циркулирует рабочее тело. К испарителю подводится теплота от низкопотенциального источника тепла — воздуха, вследствие чего осуществлять подогрев возможно исключительно в летний период.

Температура кипения в испарителе рассчитывается по формуле:

$$t_o = \frac{t'_e + t''_e}{2} - \Delta t_o \quad (1)$$

В ходе расчетов найдем температуру испарителя, она будет равна 13°C. Температура в конденсаторе определяется по формуле:

$$t_B^{cp} = \frac{t''_B - t'_B}{2} \quad (2)$$

$$t_K = t_B^{cp} + \Delta t \quad (3)$$

Температура конденсатора будет равна 35°C.

Воспользуемся диаграммой фреона R410-A чтобы построить цикл (рис. 1).

Приняв диаметр труб равным 0,02м, а скорость равной 2.5 м/с определим расход:

$$G_B = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v_{cp} \cdot \rho \quad (4)$$

Расход воды при данных условиях равен 0,01 кг/с, холодопроизводительность, в свою очередь будет равна:

$$Q_0 = G_e \cdot c_p \cdot (t'_e - t''_e) \quad (5)$$

$$Q_0 = 23,764 \text{ кДж}$$

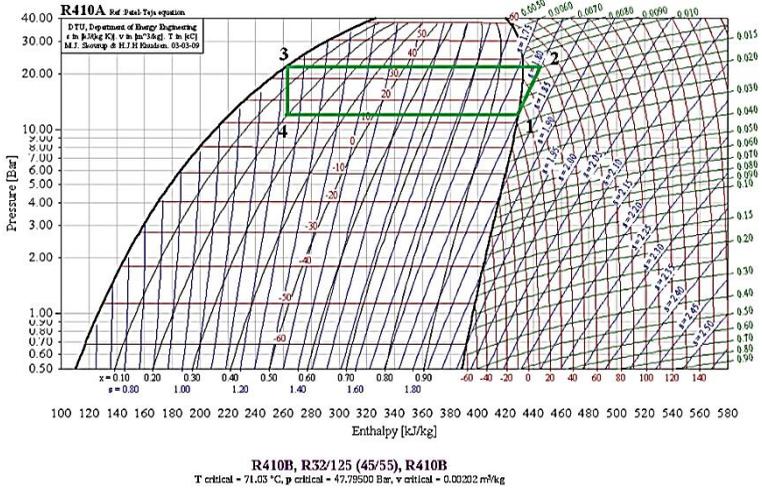


Рис. 1. Цикл работы теплового насоса

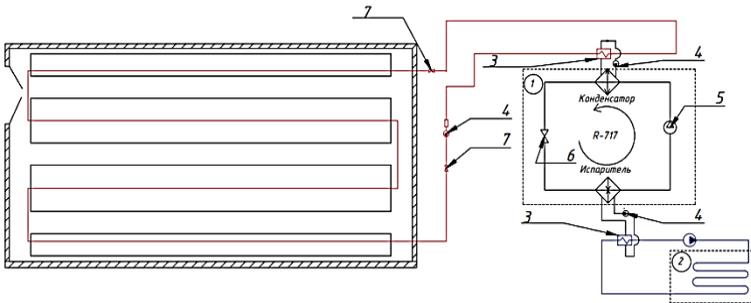


Рис. 2. Схема установки капельного полива с подключенным тепловым насосом

Исходя из требуемых характеристик подходящим вариантом будет тепловой насос Геотермальный Тепловой насос Waterkotte DS 5050 T, его мощность будет достаточной для подогрева поливочной воды до 25°C в течение летнего сезона, а использование в качестве хладагента R410-A делает установку экологически безопасной по причине химической инертности данного агента.

Литература

1. <https://waterkotte.com.ru/teplovye-nasosy> - каталог тепловых насосов Eco Touch
2. Fedotova E. V. Thermal regime impact on rice yield // Land Reclamation and Hydraulic Engineering [Electronic resource]. 2021. Vol. 11, no 4. P. 87–102. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/en/article?n=1239> (date of access: 22.11.2021). DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-4-87-102.
3. Dobrachev Y.P., Fedotova E.V. Water supply volumes and temperature regime influence on rice productivity in the Lower Kuban reclamation complexes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Vol. 577. – Mathematical modelling of technical and economic systems in agriculture II 10 May 2020, Russian Federation. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/577/1/012005>.
4. Влияние температуры слоя воды рисовых чеков на урожайность риса // Рисоводство. – 2019. – № 2 (43). – С. 48-51.

УДК 621.6.022

Д.А. ЗОЛИН, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: daniilzolin@yandex.ru

Создание технологически комфортных условий для выращивания растений

Аннотация. Приведен способ организации предварительного подогрева поливочной воды путем подключения солнечного коллектора к системе капельного орошения.

Ключевые слова: солнечный коллектор, капельное орошение, вода.

D.A. ZOLIN, student

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: daniilzolin@yandex.ru

Creating technologically comfortable conditions for growing plants

Abstract: The article presents the method of organizing preheating of irrigation water by connecting a solar collector to a drip irrigation system.

Key words: solar collector, drip irrigation, water.

В современном сельском хозяйстве широко используются технологии, которые значительно повышают его эффективность, в том числе за

счёт искусственного создания комфортных условий для выращивания растений. Такие условия определяются: влажностью воздуха и почвы, концентрацией кислорода и углекислого газа, температурой воздуха, освещенностью, а также температурой поливочной воды, с помощью которой можно нагреть почву. В табл. 1 приводятся оптимальные температуры поливочной воды для некоторых видов растений [1].

Таблица 1. **Оптимальная температура поливочной воды для некоторых видов растений**

Показатели и условия	Огурец	Томат	Перец	Баклажан	Капуста
Температура воды, °С	23-26	22-25	25-30	25-30	18-20

Одним из решений для осуществления полива растений, применяемых как в отечественной, так и в зарубежной практике, является автоматизированный капельный полив, позволяющий подавать к растениям воду в строго регулируемом объеме без участия человека. Это приводит к экономии воды и сокращению расходов на обслуживающий персонал.

Благодаря исследованиям Лори Р. Толли-Джордан [5], проведенным в 2007 году, была доказана связь между температурой воды, используемой для полива растений и их метаболической активностью. В ходе экспериментов ученой было доказано, что растения дикого риса, выращенные в прохладной воде, имеют меньшие и более короткие листья, чем растения, выращенные в более теплой воде. Кроме того, низкая температура воды препятствует возникновению репродуктивных структур.

Для подогрева поливочной воды в настоящей работе предлагается использовать солнечные коллекторы. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

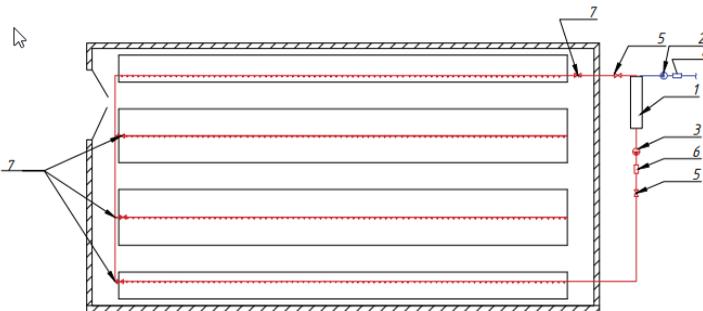


Рис. 1. Схема капельного орошения для закрытой теплицы при установке солнечного коллектора: 1 – солнечный коллектор; 2 – питательный насос; 3 – циркуляционный насос; 4,6 – фильтры грубой и тонкой очистки; 5,7 – запорная и регулирующие задвижки

Для расчета теплового потока, исходящего от труб к корням и грунту, используется дифференциальное уравнение Фурье для нестационарного режима [4] при следующих граничных условиях: температура поливочной воды равна 25 °С, температура грунта зимой равна -1°С, летом – 16,7°С [3], коэффициент теплопроводности влажной суглинистой почвы принят равным $\lambda=2,5586$ Вт/м·К при влажности грунта 50% [2].

В работе приняты следующие допущения: в расчете не рассматривается массообмен при смачивании почвы поливочной водой; не учитывается влияние термохимических процессов на теплообмен между водой и почвой. Расчетную область будем рассматривать как плоскую стенку с протекающим в ней процессом – теплопроводностью. При этом подразумевается использование теплозащитных материалов на глубине, определяемой длиной корней растений, что позволяет принять потери теплоты вглубь грунта равными нулю.

На границах расчетной области принимаем граничные условия I рода:

$$T_w = const; \quad (1)$$

где T_w – температура на границе расчетной области.

Температуру на поверхности, исходя из рекомендаций, принята равной $T_{w1}=25$ °С [1]. Средняя глубина прорастания корней рассады принята $\delta=0,4$ метра [2]. Температуру почвы на глубине δ принята $T_{w2}^1=16,7$ °С в тёплый период года и $T_{w2}^3=-1$ °С в холодный период года [3]. Расчетная площадь произрастания рассады 16,5 м².

Для определения удельной тепловой нагрузки рассчитывается удельный тепловой поток от воды к почве по формуле [4]:

$$q = \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\frac{\delta}{\lambda}}. \quad (2)$$

В табл. 2 приведены результаты расчета при различных значениях δ .

Таблица 2. Значения удельных тепловых потоков в зависимости от глубины прорастания растений

q , Вт/м ²	δ , м				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Теплый период	106,2	53,1	35,4	26,5	21,2
Холодный период	332,6	113,2	75,5	56,6	45,3

Вывод: для обеспечения качественного выращивания растений определены значения тепловых потоков в грунте в зависимости от длины корней и времени года.

Литература

1. Рау, А. Г. Влияние температуры слоя воды рисовых чеков на урожайность риса / А. Г. Рау, А. Ш. Бакирова // Рисоводство. – 2019. – № 2(43). – С. 48-51. – EDN ZENOVV.
2. Трунов Ю. В., Родионов В. К., Скрипников Ю. Г. и др. «Учебники и учебные пособия для студентов средних специальных учебных заведений» // " Плодоводство и овощеводство. — М.: Москва, «КолосС», 2008. — 464 с.
3. <http://www.e-boiler.ru/tabлица-zavisimosti-temperatury-grunta-ot-glubiny-i-mestopolozheniya>, 22.02.2023.
4. Бухмиров В.В. Тепломассообмен: Учебное пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина». – Иваново, 2014. – 360с.
5. Wooten, J.A., Tolley-Jordan, L.R. Validation of phylogenetic signals in amplified fragment length data: testing the utility and reliability in closely related taxa. BMC Res Notes 2, 26 (2009).

УДК 662.99

В.Ю. СОКОЛОВ, к.т.н.,
Т.Ю. СОКОЛОВА к.экон.н.,

Институт энергетики, электроники и связи
Оренбургского государственного университета
460048, г. Оренбург, ул.Шевченко, 28
E-mail: teploosu@mail.ru

Использование системы утилизации тепла уходящих газов при строительстве водогрейной котельной нового ГПЗ

Аннотация. В работе приведены схемы возможного подключения основного оборудования при утилизации тепла уходящих газов нового ГПЗ

Ключевые слова: утилизация тепла, уходящие газы, газоперекачивающие агрегаты

V.Y. SOKOLOV, Candidate of Technical Sciences,
T.Y. SOKOLOVA, Candidate of Economics.,

Institute of Energy, Electronics and Communications Orenburg State University
460048, Orenburg, Shevchenko str., 28
E-mail: teploosu@mail.ru

The use of the exhaust gas heat recovery system during the construction of the Gas Processing Plant hot water boiler house

Abstract. The paper presents the schemes of possible connection of the main equipment during the heat recovery of the outgoing gases of the Gas Processing Plant.

Key words: heat recovery, exhaust gases, gas pumping units.

Теплоснабжение этапа строительства площадки нового ГПЗ предусмотрено согласно задания на проектирование от проектируемой водогрейной котельной №2 позиция по генплану 170 блочно-модульного исполнения компании ООО «Модульные котельные системы» и сетей пароснабжения согласно Технических условий от ТЭС.

К потребителям тепла на ГПЗ относятся: системы отопления, вентиляции и горячего водоснабжения производственно-вспомогательных зданий; система теплоснабжения технологического оборудования (тепловой обогрев резервуаров, теплоспутники); системы технологического пароснабжения технологических объектов площадки ГПЗ 4 этапа строительства.

В качестве теплоносителей на этапе 4 ГПЗ используются:

Теплоноситель для системы отопления и вентиляции:

- НWSP – трубопровод теплофикационной воды, прямой (Т1). Давление $P=0,70$ МПа, температура $T=95$ °С.

- НWRP – трубопровод теплофикационной воды, обратный (Т2). Давление $P=0,40$ МПа, температура $T=70$ °С.

Теплоноситель для системы горячего водоснабжения:

- НWS – трубопровод подающий (Т3). Температура $T=70$ °С.

- НWC - трубопровод циркуляционный (Т4). Температура $T=50$ °С.

Теплоноситель системы пароснабжения:

- US - трубопровод водяного пара (Т7). Давление P от 1,0 до 1,6 МПа, температура T от 200 до 250 °С от ТЭС;

- UWCH – трубопровод конденсата водяного пара (Т8). Давление $P = 1,0$ МПа, температура $T=100$ °С. Возвращается на ТЭС. Объем возвращаемого конденсата от 50 до 100% в зависимости от режима производства.

В зависимости от назначения зданий, сооружений приняты следующие режимы потребления теплофикационной воды на нужды:

- отопления производственных, вспомогательных зданий, тепловой обогрев технологических резервуаров, трубопроводов и резервуаров запаса воды - круглосуточно в течение отопительного периода;

- вентиляции зданий вспомогательного назначения - по режиму работы – от круглосуточного в течение отопительного периода до 8 часов в сутки;

- горячее водоснабжение потребителей вспомогательных производств ГПЗ - круглогодичное централизованное от котельной №2.

Основным источником теплоснабжения площадок нового ГПЗ являются УТО, установленные на агрегатах ГПА-32 на площадках компрессорных цехов ДКС (позиция по генплану 1-110 ... 6-110). Единичная теплопроизводительность УТО ГПА составляет равной 8,0 МВт. Для каждой технологической нитки предусмотрены два утилизационных теплообменника (по одному на ГПА). Всего 12 УТО общей теплопроизводительностью 96 МВт.

Теплофикационная вода от УТО ГПА вырабатывается по температурному графику 105–80 °С и является теплоносителем в системе утилизации тепла. Система утилизации тепла уходящих газов является единой для этапов строительства нового ГПЗ.

В начальный период (до ввода в эксплуатацию ДКС) источником тепла служит для объектов 4 этапа строительства водогрейная котельная №2.

После ввода в эксплуатацию всех очередей ДКС теплосъем составит 96 МВт, что станет достаточно для компенсации тепловой нагрузки объектов 3 4 этапов строительства до температуры наружного воздуха минус 27 °С (расчетная). При более низких температурах наружного воздуха котельные 4 этапа №2 и 3 этапа №1 запускаются в рабочем режиме, догревая греющий теплоноситель системы утилизации тепла перед подачей его на сетевые теплообменники котельных.

Производительность УТО ДКС зависит от номинальной загрузки ГПА и количества работающих технологических ниток. После ввода в эксплуатацию УТО ГПА циркуляция теплоносителя в системе утилизации тепла выполняется насосами утилизационной насосной станции.

Регулирование теплопроизводительности УТО заключается в поддержании температуры воды на выходе из УТО равной заданной, путем изменения расхода выхлопных газов через теплообменный газоход в зависимости от температуры наружного воздуха. Система автоматического управления УТО входит в состав САУ ГПА: эксплуатация оборудования предусматривается без постоянного присутствия обслуживающего персонала. Запуск, остановка, управление и контроль над работой оборудования осуществляется из помещения операторной, все оборудование поставляется полностью готовым к эксплуатации и имеет необходимый комплект монтажных частей.

Описание процесса производства тепловой энергии. Комплектная котельная №2 мощностью 73,5 МВт, предназначена для теплоснабжения технологической площадки завода нового ГПЗ. Автоматизированная, водогрейная, блочно- модульная котельная №2 по надежности отпуска тепла потребителям котельная относится к первой категории. Степень огнестойкости здания котельной II, класс конструктивной пожарной опасности С0, категория помещения котельного зала по пожарной опасности Г. Тепловая схема котельной – двухконтурная с развязкой через теплообменники, позволяющая выполнять регулирование температуры теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха.

Параметры теплоносителя в котловом контуре котельной 105-80 °С, в сетевом контуре – 95–70 °С. В котельной установлено 6 водогрейных жаротрубных котла «Термотехник» мощностью 14,7 МВт (0-12-87 ВО-001А/Ф). Максимальный расход соответствует выбранной мощности 73,5 МВт (без учета резервного котла). Мощность резервного

котла 14,7 МВт. Опираясь на философию управления заводом, котельная может работать в трех режимах:

Вода из утилизационных теплообменников (WHE) поступает в котельную и смешивается с водой на выходе из насосов котлового контура для дальнейшего подогрева в котлах.

Вариант 1:

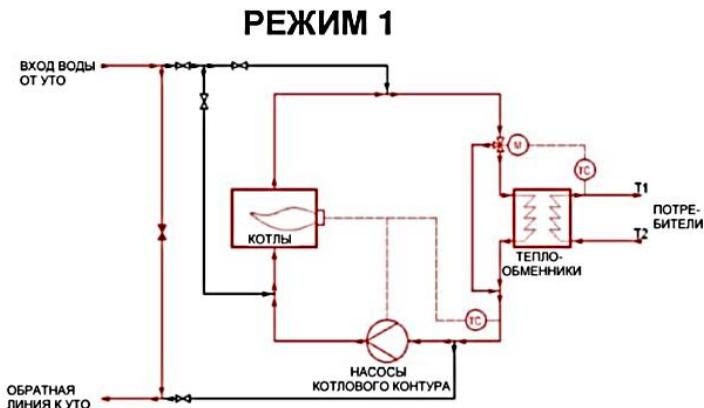


Рис. 1. Котельная работает автономно: котлы, насосы и теплообменники работают независимо от внешней системы утилизации отработанного тепла от подрядчика P2

Вариант 2

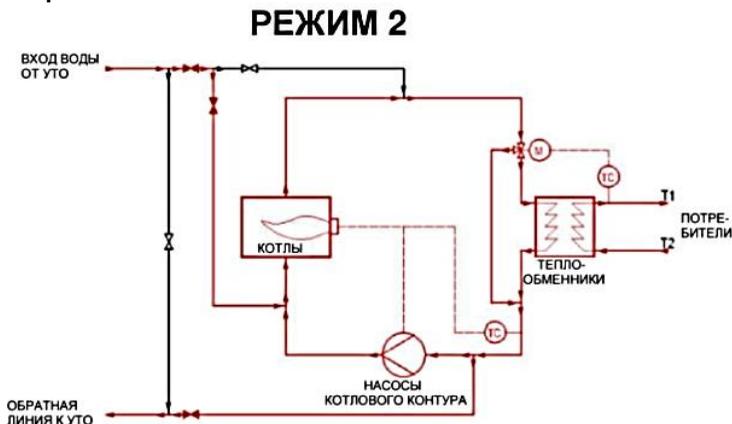


Рис. 2. Котельная работает в сочетании с внешней системой генерации тепла подрядчиком P2

В третьем варианте котельная работает с выработкой тепла, производимой только системой утилизации отработанного тепла подрядчика Р2. Вода из утилизационных теплообменников (УТО) поступает в контур котельной перед теплообменниками. Если требования по давлению и температуре для воды УТО в пределах котельной достигнуты, котельная может работать в варианте 2 с переменной тепловой мощностью УТО.

Вышеуказанные конфигурации показаны на рисунках выше (путь циркуляции воды выделен красным цветом).

Литература

- 1.РД 51-1-95 «Нормы технологического проектирования газоперерабатывающих заводов»
2. 3971-WZ-SG-1002 «Основные требования технологического проектирования».

АВТОРСКИЙ ИНДЕКС

А		ВЕСЕЛОВА И.Е.	401
АБДУЛЛИНА А.А.	348	ВИНОГРАДОВ В.Н.	377
АВДОКУНИН Н.В.	404	ВЛАДИМИРОВ Н.С.	334, 419
АДАКИН Р.Д.	192	ВЯТКИН А.В.	169, 178
АКСЕНЧИК К.В.	357		
АНДРЕЕВ А.С.	357	Г	
АНТОНОВ П.А.	360	ГАБИТОВ Р.Н.	327
АРБАТСКИЙ А.А.	237	ГАЙДИНА Ю.А.	7, 11
АСТРАХАНЦЕВА И.А.	352	ГАЛИАСКАРОВ Э.Г.	352
АУНГ К.М.	197	ГАРЯЕВ А.Б.	222, 225, 231
АХМЕД А.А.	259	ГИЛЬМУТДИНОВ Е.Д.	51
АШИХМИН А.Г.	237	ГЛАЗОВ В.С.	205, 215
Б		ГО ЦЗИНЬФА	48
БАГАУТДИНОВА Г.Ф.	435	ГОЛДОБИН Д.Д.	213
БАДРЕТДИНОВА Г.Р.	181	ГОЛУБЕВ А.В.	3, 14, 17, 32, 368
БАННИКОВ А.В.	409	ГОРБУНОВ В.А.	122, 128, 131, 134, 137, 143
БАННИКОВА С.А.	412		
БАРОЧКИН А.Е.	54, 68, 74	ГОРДЕЕВ В.В.	274
БАСОВА Е.В.	365	ГОРИНОВ О.И.	331
БАШЛЫКОВ М.С.	371	ГОРШЕНИН С.Д.	51, 71
БЕЗУГЛОВ Р.В.	416, 423, 425,	ГУЖОВ С.В.	371, 374
БЕЗУГЛОВ Р.В.	431, 445	ГУРЬЯНОВ А.И.	187, 189
БЕЛОНОГОВ М.В.	172	ГУРЬЯНОВА М.М.	189
БЕЛЯКОВ А.А.	140, 146	ГУСАКОВ А.А.	267
БЕЛЯКОВ А.Н.	360, 362, 365	ГУСЕВ Е.В.	302, 305
БЕРНАНС М.С.	267	ГУСЕНКО А.Г.	439
БЛИНОВ О.В.	337		
БОБКОВ С.П.	352	Д	
БОГДАН А.Р.	86	ДАНИЛОВ О.М.	74
БОРИСОВ А.А.	58, 213	ДЕМИДОВ Д.А.	398
БОРИСОВ Б.В.	169, 178	ДМИТРИЕВ А.В.	181
БОРОДИН А.Н.	327	ДОБРИНСКАЯ А.А.	215
БУБНОВ К.Н.	368	ДОБРЫДНЕВ Д.В.	425, 445
БУДАНОВ И.А.	453	ДОЛИНИН Д.А.	327
БУРАКОВ А.Ю.	200	ДРОНОВ С.А.	439
БУРАКОВ И.А.	197	ДЬЯКОНОВ Е.М.	416, 423, 425, 431
БУРОВ В.Д.	40, 43, 46, 48		
	86	Е	
БУХМИРОВ В.В.	156, 293, 298, 319	ЕВДОКИМОВ О.А.	187
БУШУЕВ Е.Н.	89, 95, 298, 319	ЕВДОКИМОВ О.А.	40
БУШУЕВА Н.В.	95	ЕГОРОВ Р.И.	172
БЫЛИЧКИН В.И.	86	ЕРЕМИНА Н.А.	111
В			
ВАЛИНЕЕВА А.А.	228	Ж	
ВАСИЛЕВИЧ С.В.	383	ЖУКОВ В.П.	58, 360, 362, 368, 377, 392
ВАСИЛЬЕВ С.В.	419		
ВЕДМИЧЕВ Н.А.	416, 423, 431 445	З	
		ЗАЙЦЕВА Е.В.	115
		ЗАПОЛЬСКАЯ Е.М.	161
		ЗАХАРОВ В.М.	308
		ЗИДЕХАНОВА А.А.	101, 103

ЗИНОВЬЕВА А.С.	58	МАСЛОВ А.В.	237
ЗИНУРОВ В.Э.	348	МАТУХНОВ Т.А.	218
ЗОЛИН Д.А.	456	МАТУХНОВА О.Д.	218, 222
ЗОТОВА К.В.	108	МАТЮХИН В.И.	281
И-Й		МАТЮХИНА А.В.	281
ИВАНОВА Н.Г.	98	МЕДВЕДЕВ И.И.	290
ЙЕ В.А.	197	МЕЧТАЕВА М.Н.	128, 134, 137, 143
К		МИНЕЕВ П.А.	128, 134, 137, 143
КАДЫРОВ Ч.А.	205	МИРОНОВА Т.С.	29
КАРПЫЧЕВ Е.А.	92, 98	МИТРОФАНОВ А.В.	383
КИЕТ С.В.	108	МИТЯЕВ В.Д.	205
КИРСАНОВ А.Ю.	251	МИТЯКОВ В.Ю.	267
КИРСАНОВ Ю.А.	251	МИХАЙЛОВ Е.А.	34
КОБЗЕВА А.А.	205, 215	МОЛЬКОВ Н.С.	312
КОЖУХАРЬ С.Д.	43, 46	МУРАВЬЕВ И.К.	20, 23, 26
КОЖУХОВ Н.Н.	290	МУРТАЗИН Р.Э.	237
КОЗЛОВА М.В.	409	МУЧНИК В.А.	228
КОКУЛИН И.А.	61, 377	Н	
КОЛИБАБА О.Б.	192, 312, 315, 327	НАГОРНОВА Т.А.	169, 178
КОМОВА О.В.	187	НАСЫРОВ Р.Р.	245
КОНОВАЛОВ А.В.	442, 448, 451	НЕКРАСОВ О.В.	43, 46
КОНОВАЛОВ Д.А.	290	НЕУМОИН А.Д.	315
КОРНИЛОВА М.И.	380, 395, 398	НИ А.Э.	386
КОРОЧКИНА Е.Е.	322, 337	НИКИТИНА И.С.	200
КОСЯКОВ С.В.	451	НИКИТИНА Ю.Ю.	106
КРУТИКОВ Н.А.	14	НИКОНОРОВ А.Н.	29
КУЗНЕЦОВ Г.В.	169, 178, 264	НОСКОВА К.Р.	189
КУЗНЕЦОВА Е.А.	32	О	
КУРИЦИН Д.Д.	184	ОГОРОВОДА Д.В.	225
КУТРАКОВ П.А.	54	ОГУРЦОВ А.В.	389
Л		ОДИНЦОВ И.О.	225
ЛАПТЕВ А.Г.	255	П	
ЛАПТЕВА Е.А.	255	ПАНКОВ С.А.	64, 77
ЛАРИН А.Б.	101, 103, 108	ПАПИН В.В.	416, 423, 425, 431, 445
ЛЕБЕДЕВА Д.О.	92	ПАРФЕНОВ Г.И.	308
ЛЕДНЕВ В.А.	17	ПАХОТИНА И.Н.	322
ЛЕДУХОВСКИЙ Г.В.	58	ПЕКУНОВА А.В.	89
ЛЁТИН К.А.	337, 389	ПЕТИН С.Н.	213
ЛОБОВ А.Д.	215	ПЕТРОВ А.В.	380
ЛОГИНОВА А.Ю.	89	ПЕТРОВА Г.М.	277
ЛОНШАКОВ Н.А.	122	ПЛЕСАХИН И.В.	281
ЛУКИН С.В.	277	ПЛЕТНИКОВ С.Б.	80
ЛЮБИВЫЙ Е.В.	175	ПЛЕШАНОВ К.А.	340, 344
М		ПОЛОВНИКОВ В.Ю.	175
МАГОМЕДОВА Р.	234, 248	ПОЛЯКОВ М.В.	242
МАКСИМОВ В.И.	169, 178	ПОПОВ С.К.	228, 242
МАЛЫГИН Д.С.	184	ПОРОВОДСКИЙ Д.В.	277
МАНАКИНА М.О.	26	ПОТЕМКИНА В.О.	448
МАРШАЛОВ Е.Д.	32, 34	ПРОНИН А.Н.	184

ПРУН О.Е.	231	ТОРОПОВ Т.Д.	140
ПУРДИН М.С.	234, 248	ТРИФОНОВ А.Ю.	20
Р		ТРУБАЕВ П.А.	259
РАКУТИНА Д.В.	319	ТЮТИКОВ В.В.	308
РАМАЗАНОВ Р.С.	259	У	
РОДИОНОВА М.В.	298	УРАКОВ И.А.	200
РОМАНИН П.Д.	68	УХАЛОВА Е.Г.	106, 108
РЯБОВ Г.А.	340, 344	Ф	
РЯБОВА Е.И.	64	ФЕДОТОВ Г.А.	271
РЯБОВА Н.А.	106	ФЕДЮХИН А.В.	439
РЯЗАНОВ А.В.	184	ФЕОКТИСТОВ А.В.	274
С		ФИЛИМОНОВ В.Р.	416, 423, 431
САВЧЕНКОВА Н.М.	203, 245	ФИЛИППОВ И.Г.	340, 344
САЛАГАЕВ С.О.	169	ФОМИЧЕВ М.Д.	392
САЛИХОВ Ф.Ю.	178	ФРАНТОВ Н.А.	442
САРАЕВА Э.В.	115	Х	
САФИН Ф.Р.	435	ХАЙРУЛЛИН Т.И.	245
СВЕТУШКОВ И.И.	293, 298	ХАЛИД ХАМЕД ЭЛЬШЕЙХ	340, 344
СЕМИН Д.В.	439	ХАРИТОНОВ Б.М.	140, 146
СЕННИКОВ В.В.	448, 451	ХАХАЛЕВ Ю.А.	380, 395, 398
СЕРГИЕНКОВА А.А.	302, 305	ХАХАЛЕВА Л.В.	380, 395
СИГИДОВ Я.Ю.	48	ХЛОНД В.Д.	395
СИМОНЕНКОВ А.И.	245	ХРИПКОВА Л.Н.	117
СИНЬБУХОВА М.С.	203	Ц	
СМИРНОВ В.В.	448, 451	ЦАПЛИНА Т.А.	92
СМИРНОВ Н.Н.	308	Ч	
СОЗИНОВ А.В.	334	ЧИБИСОВА А.В.	331
СОЗИНОВА Т.Е.	334	ЧУХИН И.М.	125
СОКОЛОВ В.Ю.	459	Ш	
СОКОЛОВА Т.Ю.	459	ШЕЛЕМЕХОВА С.Д.	175
СОКОЛЬСКИЙ А.И.	302, 305	ШИЛОВ М.А.	365
СОЛИЛОВ Д.А.	61	ШИЛОВА А.В.	146
СОЛНЦЕВ Д.Н.	184	ШИНКЕВИЧ Д.А.	23
СОЛОВЬЕВА С.Е.	115	ШИРОКОВ М.О.	362
СПИРИН Н.А.	271	ШМАКОВ А.С.	425, 445
СТАВРОВ С.Г.	83	ШМЕЛЁВ А.С.	389
СТЕПИН М.Ю.	360	ШОМОВ П.А.	312, 315
СУГЛИЦКАЯ Л.М.	184	ШПЕЙНОВА Н.С.	383
СУЛЕЙМАНОВ М.Г.	298	ШУВАЛОВ С.И.	71
СУСЛОВ С.П.	237	Щ	
СЫРОДОЙ С.В.	264	ЩАНИЦЫН Е.М.	71
Т		ЩЕПЕТИЛЬНИКОВ Э.Ю.	149
ТАБУРЧИНОВ Р.И.	172	Ю	
ТАГУНОВА Ю.В.	115	ЮРКИНА М.Ю.	218
ТВЕРСКОЙ М.Ю.	3, 37	Я	
ТВЕРСКОЙ Ю.С.	3, 7	ЯКОВЛЕВ И.В.	404
ТЕМЛЯНЦЕВ М.В.	161, 274	ЯРУНИНА Н.Н.	98
ТЕМЛЯНЦЕВА Е.Н.	161		
ТЕПЛЯКОВА С.С.	122, 131		
ТИХОНОВ А.И.	448		
ТОРОП Д.В.	374		

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 4. "СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ"	3
Секция 6. "ТЕПЛОВЫЕ И АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ"	40
Подсекция "Тепловые электрические станции"	40
Подсекция "Технология воды и топлива на тепловых и атомных электрических станциях "	89
Подсекция "Атомные электрические станции"	122
Секция 9. "ТЕПЛООБМЕН В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ"	156
Секция 12. "МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ"	352
Секция 17. "ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА"	404

МАТЕРИАЛЫ

Международной научно-технической конференции
**«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ»**
(XXII Бенардосовские чтения),

*75-летию теплоэнергетического факультета
посвящается*

Печатаются в авторской редакции

II том
Теплоэнергетика

Электронное издание

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34