

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию **Барочкина Алексея Евгеньевича**

«Моделирование, расчет и оптимизация многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических систем и установок», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности

2.4.5 – Энергетические системы и комплексы (технические науки)

Актуальность темы. Методики расчета различных тепломассообменных процессов разработаны к настоящему времени достаточно полно. Эти методики основаны на опытных или аналитических зависимостях, полученных с помощью теории подобия, лабораторных и промышленных экспериментов и теоретических моделей. Для расчетов аппаратов, устройств технологических схем, в которых реализуются подобные процессы, также разработаны разнообразные конструкторские и поверочные методики. В современных условиях на энергомашиностроительных предприятиях внедряются автоматизированные системы разработки и проектирования энергетического оборудования. Для получения наибольшего эффекта от реализации таких систем в них должны быть включены методики расчета разрабатываемого энергооборудования. Такое исполнения информационных систем позволяет максимально быстро и эффективно учитывать индивидуальные потребности заказчиков, предлагая оборудование с широким диапазоном технических характеристик, а также осваивать разработку, проектирование и изготовление нового оборудования. Предлагаемые в диссертационной работе Барочкина А.Е. методы матричной формализации для расчета сложных многоступенчатых и многокомпонентных систем позволяют реализовать единый подход в расчетных блоках систем

проектирования и разработки теплообменного оборудования и технологических схем преобразования энергии.

Степень разработанности темы диссертации. Несмотря на имеющиеся методики расчетов теплообменных аппаратов к настоящему времени остаются неизученными важные аспекты моделирования и оптимизации рассматриваемых технологических процессов теплообмена. В частности, процессы теплообмена в технологических системах сложной структуры с несколькими элементами: многоступенчатые теплообменные системы со ступенями, которые имеют произвольное число входных и выходных потоков. Отсутствуют обладающие приемлемой точностью модели процессов разделения при многоступенчатой классификации многокомпонентных смесей разнопрочных компонентов. Не представлены задачи матричного моделирования теплообменных процессов разделения смесей жидкостей с разными физическими свойствами компонентов. Для создания единого подхода к расчетам подобных аппаратов и систем необходимо совершенствование методов матричной формализации и параметрической идентификации.

Научная новизна работы определяется тем, что:

1. Разработаны научные основы и методология математического описания процессов формирования энергомассовых потоков в многокомпонентных многопоточных многоступенчатых энергетических системах и установках, базирующиеся на матричной формализации уравнений баланса энергии и массы теплоносителей.
2. В рамках предложенной методологии разработаны математическая модель паротурбинной установки и единый подход к математическому описанию ТЭС как многокомпонентной многопоточной многоступенчатой энергетической системы; получены и проанализированы результаты

моделирования с целью построения энергетических характеристик теплофикационного турбоагрегата, выполнено сравнение результатов расчета с энергетическими характеристиками действующего турбоагрегата, показана достоверность и обоснованность предложенного подхода.

3. Разработана математическая модель многопоточных многоступенчатых теплообменных систем, каждая ступень которых может иметь произвольное число входных и выходных потоков. Порядок использования и возможности предложенного подхода продемонстрированы на примере четырехступенчатой трехпоточной системы теплообменных аппаратов, получены и проанализированы результаты моделирования.

4. Разработано математическое описание многопоточных теплообменных аппаратов с учетом возможного фазового перехода теплоносителей. Найдены и проанализированы аналитические и численные решения для контактного теплообменного аппарата, используемого для утилизации влаги и тепловой энергии из дымовых газов котельных установок. Определены конструктивные характеристики теплообменного аппарата для получения заданных значений количества конденсата или снижения температуры уходящих газов.

5. Разработана модель фракционирования многокомпонентной смеси сыпучих материалов в двухступенчатой классифицирующей установке. На основании полученных экспериментальных данных по исследованию разделения смеси разнородных сыпучих компонентов в классифицирующей системе выполнена структурная и параметрическая идентификация модели и показана ее адекватность.

6. В рамках предложенного подхода для случая использования в качестве теплоносителей смеси компонентов с разной температурой кипения получена математическая модель процесса тепломассообмена, позволяющая определить степень разделения компонентов и качество готового продукта по содержанию в нем нецелевых примесей при различных способах организации процесса; предложены и проанализированы возможные направления совершенствования процесса.

8. В рамках проведенных исследований сформулирована задача оптимизации процессов теплообмена в системе многоступенчатых теплообменных аппаратов, один из теплоносителей в которой представлен многокомпонентной смесью.

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Достоверность результатов диссертационного исследования обоснована использованием общепринятых физико-математических моделей, основанных на уравнениях баланса массы и энергии; согласованием в пределах погрешности расчетных и экспериментальных данных; публикацией результатов исследований в ведущих рецензируемых научно-технических журналах.

В первой главе диссертации автором выполнен обзор и анализ опубликованных данных о процессах тепло- и массообмена в многопоточных многоступенчатых установках. Анализ литературных источников показал, что вопросам моделирования и анализа многопоточных и многоступенчатых теплообменных систем в той или иной мере посвящено большое число исследований. В качестве одного из основных направлений повышения эффективности работы энергетических систем и установок многими авторами, занимавшихся данной проблемой, определено снижение потерь теплоты с уходящими газами в котельных агрегатах. Продукты сгорания природного газа содержат большое количество водяных паров и обладают значительным потенциалом для утилизации теплоты. Полученный из уходящих газов конденсат водяных паров дополнительно может быть использован в тепловых схемах котельных.

Несмотря на большое количество научных публикаций по утилизации теплоты дымовых газов и положительному опыту применения разработанных конструкций конденсационных теплоутилизаторов в промышленности, в энергетике основная масса газовых котельных и тепловых электрических станций в настоящее время продолжают работать без внедрения установок глубокой утилизации тепла. Этому есть ряд причин, вызванных отсутствием

универсальных методик расчета и проектирования теплоутилизаторов конденсационного типа. Для систематизации существующих моделей и подходов к моделированию тепломассообменных процессов проведен анализ опубликованных данных, в результате которого разработана система классификации и кодификации задач тепломассообмена в многофазных многопоточных средах. Предложенная система классификации и кодификации позволяет более четко ориентироваться в новизне постановки представленных автором задач. Проведенный анализ опубликованных данных показал, что остались нерешенными или частично решенными вопросы описания и оптимизации процессов тепломассообмена в многопоточных многокомпонентных системах, определения оптимальной структуры потоков энергии и массы теплоносителей. С учетом результатов анализа сформулированы задачи работы, решение которых необходимо для достижения поставленной цели диссертации.

Во второй главе диссертации с использованием методологии матричной формализации разработаны теоретические основы моделирования многоступенчатых многопоточных энергетических систем. Построена энергетическая характеристика турбины ПТ-65/75-130/13. Необходимо отметить, что представленная во второй и пятой главах зависимость расхода теплоты на выработку электроэнергии турбины редко используется при анализе технико-экономических показателей теплофикационных турбин. Более корректный показатель – выработка электроэнергии на тепловом потреблении.

В качестве примера реализации матричного подхода представлены результаты анализа четырехступенчатого, трехпоточного теплообменного аппарата с различными схемами движения теплоносителей. Получено аналитическое решение распределение температур в установке охлаждения дымовых газов в смешивающем теплообменнике без учета конденсации водяных паров из газа.

В третьей главе приведены модели расчетов многопоточных аппаратов при наличии фазовых переходов в теплоносителях. Рассматриваются подходы к описанию, в рамках общей концепции работы, контактных экономайзеров, предназначенных для утилизации теплоты уходящих газов в котельных агрегатах. В результате решения системы дифференциальных уравнений получена информация о величине зон аппарата, в которых происходит конвективный теплообмен между теплоносителями и зон, в которых реализована конденсация водяных паров из уходящих газов.

Для демонстрации возможностей метода рассмотрен пример расчета утилизационной установки дымовых газов для энергоблока мощностью 800 МВт. Считаем, что реализация такой установки маловероятна из-за взаимодействия охлажденных уходящих газов на выходе из дымовой трубы с окружающим воздухом, возможной конденсации влаги окружающего воздуха в устье трубы с образование агрессивных растворов.

В четвертой главе представлены модели процессов разделения многокомпонентных смесей сыпучих материалов в сложных технологических системах измельчения и разделения компонентов с различными физическими свойствами. В качестве модели гранулометрической характеристики компонентов использовано распределение частиц по их размерам. Для идентификации разработанной модели на лабораторной установке проведены специальные экспериментальные исследования. По результатам опытных данных выполнена идентификация и проверка адекватности матричной модели, которая показала, что модель при достаточной простоте вычислений позволяет достоверно описывать фракционирование и формирование массовых потоков в многоступенчатой системе классификации для разнородных компонентов.

Представлены также результаты моделирования установок для разделения жидких компонентов по их температурам кипения в установках перегонки или ректификации смесей. Для описания процесса ректификации в ступени предлагается использовать вероятностную оценку попадания

фракции определенной температуры кипения в дистиллят. Считается, что в стационарном режиме фракционные потоки между ступенями стабилизируются, поэтому из ступени в газообразной форме отводится фиксированная доля каждого компонента. Для аппроксимации кривой разделения ректификации используется известная S-образная зависимость, которая удовлетворяет граничным значениям вероятностей. Предложенный подход к моделированию системы ректификации позволил сформулировать и решить задачу по оптимизации процессов тепломассообмена в системе многоступенчатых теплообменных аппаратов, один из теплоносителей в которой представлен многокомпонентной смесью. В качестве целевой функции использована суммарная экономическая эффективность функционирования системы, которая определяется суммой произведений производительности системы по i -му готовому продукту на его стоимостной показатель.

В пятой главе рассмотрены результаты экспериментальных исследований тепломассообменных систем, полученные с целью проведения идентификации, проверки адекватности и разработки эмпирического обеспечения предложенных моделей. Данные исследования проводились на конденсационных водогрейных котлах, паротурбинных установках и лабораторных классификаторах для разделения многокомпонентных смесей.

Проведены режимно-наладочные испытания конденсационных котлов мощностью 0,9 МВт. Определены оптимальные значения коэффициентов избытка воздуха, составлены режимные карты котлов. На основании расчётных и экспериментальных исследований разработаны и рекомендованы к внедрению мероприятия, направленные на повышение энергоэффективности, ресурсосбережения и надёжности работы оборудования, обеспечившие увеличение срока их безаварийной эксплуатации. Необходимо отметить, что представление КПД брутто конденсационного водогрейного котла по низшей теплоте сгорания топлива привело к нефизическому значению КПД более 100%. Считаем, что для

эксплуатационного персонала котельной целесообразно приводить КПД котла по высшей теплоте сгорания топлива, что позволит формировать более корректные алгоритмы расчета технико-экономических показателей оборудования.

Анализ данных испытаний конденсационных котлов показывают, что при повышении нагрузки степень конденсации водяных паров из уходящих газов уменьшается. Это обстоятельство заставляет осторожнее относиться к реализации данной технологии на котле энергоблока мощностью 800 МВт Пермской ГРЭС (см. главу 3)

Проведены испытания турбоустановок с турбинами Тп-115/125-130-1тп и ПТ-12-35/10М. Получены данные о теплотехнических характеристиках турбоустановок и разработаны комплексы их нормативных энергетических характеристик. Представленные в данной главе диссертации методика испытаний турбин могла быть сокращена в части, например, метрологического обеспечения испытаний.

Проведены также экспериментальные исследования по разделению смесей сыпучих материалов. В ходе проведения серии экспериментов исследовалось влияние содержания целевого компонента в смеси на результаты разделения продуктов.

В шестой главе представлены данные практического использования результатов работы. Обращает на себя внимание разнообразие решаемых Барочкиным А.Е. задач от разработки рекомендаций по совершенствованию башенных градирен, до анализа теплофикационных комплексов энергетических предприятий и городов.

Основные положения диссертации нашли отражение в многочисленных публикациях автора, а также доложены на научно-практических конференциях.

Замечания по диссертационной работе в целом.

1. Каковы ограничения применения метода матричной формализации?

2. При расчете поверхностного конденсирующего теплообменного аппарата, в который поступает перегретый пар, принимается, что в зоне снятия перегрева пар охлаждается до температуры на 15°C выше температуры насыщения. В зоне конденсации пар отдает теплоту фазового перехода и теплоту отмеченного перегрева. Имеются ли какие-нибудь рекомендации при расчете конденсирующего аппарата смешивающего типа в части граничной температуры пара (отличной от температуры насыщения), при которой происходит изменение механизма передачи теплоты с конвективного (кондуктивного) на механизм фазового перехода.

3. При анализе результатов расчетов теплообменника с прямоточным движением теплоносителей (рис. 2.13,е) утверждается, что при больших значениях поверхности теплообмена температуры теплоносителей принимают «физически нереализуемые значения». Что имеется в виду в данном случае? Какие значения температур теплоносителей имеют место?

4. Выражение 1.36 совпадает с выражением 1.37 (с. 65). На с. 238, в последнем абзаце говорится о схеме Сакмарской ТЭЦ и Саратовском НПЗ. Что имеется в виду?

Отмеченные недостатки не снижают высокого качества исследования и не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации, описанные выше. Результаты оригинальны, обладают научной новизной и практически значимы.

Заключение

Диссертационная работа Барочкина Алексея Евгеньевича является законченным научно-квалификационным трудом, выполненным автором на высоком научном уровне. В диссертации разработаны новые теоретические положения, имеющие важное значение для энергомашиностроительной и энергетической отраслей страны. В работе представлено достаточно количество примеров реализации разработанных подходов. В заключении

каждой из глав и работы в целом сделаны четкие и обоснованные рекомендации и выводы.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа отвечает требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Барочкин Алексей Евгеньевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы.

Официальный оппонент,
Главный научный сотрудник
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина», д.т.н., проф.

Аронсон
Константин Эрленович

12.09.2024

Сведения:

Адрес организации: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Телефон +7 (343) 375-44-44

e-mail: k.e.aronson@urfu.ru

Подпись Аронсона Константина Эрленовича заверяю

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
УРФУ
МОРОЗОВА В.А.

