

УДК 621.321

РАЗРАБОТКА ЭМПИРИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАТРИЧНОЙ МОДЕЛИ НАГРЕВА И ДЕАЭРАЦИИ ВОДЫ В СТРУЙНЫХ ОТСЕКАХ АТМОСФЕРНЫХ ДЕАЭРАТОРОВ

А.В. МОШКАРИН, Е.В. БАРОЧКИН, В.П. ЖУКОВ, Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, А.А. КОРОТКОВ
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Преимуществом существующих матричных математических моделей процессов тепломассообмена в многоступенчатых системах со сложной конфигурацией потоков является их универсальность – применение их к конкретным условиям требует лишь наличия значений параметров идентификации. Использование этих моделей для расчета характеристик процессов термической деаэрации воды в струйных отсеках деаэраторов атмосферного давления препятствует отсутствию эмпирического обеспечения, разработка которого и является целью настоящей работы.

Материалы и методы: Идентификация модели выполнена по результатам экспериментальных исследований процессов деаэрации в двух аппаратах, включающих в общей сложности четыре различающихся по конструкции и условиям работы струйных отсека. Эмпирическое обеспечение включает метод определения эффективной площади поверхности контакта фаз в струйном потоке и записанные в безразмерном виде уравнения для расчета коэффициентов теплопередачи и массопередачи.

Результаты: Получены значения параметров идентификации матричной математической модели термической деаэрации воды в струйных отсеках деаэраторов атмосферного давления, описывающей процессы нагрева воды в струйном потоке при конденсации водяного пара из движущейся парогазовой смеси и десорбции растворенного кислорода. Показано, что матричная модель совместно с полученными параметрами ее идентификации позволяет рассчитывать температуру воды и концентрацию растворенного в ней кислорода за струйными отсеками деаэраторов атмосферного давления с точностью 10,8 % при расчете теплообмена и 17,2 % при расчете десорбции кислорода.

Выводы: Полученная модель может быть использована для расчета процессов тепломассообмена при термической деаэрации воды в задачах конструирования струйно-барботажных деаэраторов атмосферного давления и режимной наладки эксплуатируемых аппаратов этого типа.

Ключевые слова: термический деаэратор, струйный отсек, теплообмен при конденсации, десорбция кислорода.

DEVELOPMENT OF EMPIRICAL SUPPORT FOR MATRIX MODEL OF WATER HEATING AND DEAERATION IN SPRAY SECTIONS OF ATMOSPHERIC DEAERATORS

A.V. MOSHKARIN, E.V. BAROCHKIN, V.P. ZHUKOV, G.V. LEDUHOVSKY, A.A. KOROTKOV
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Abstract

Background: The authors describe universality of the existing matrix mathematical models of heat-mass exchange processes in multistage systems with complex stream configuration as their advantage. Their usage in specific conditions requires only identification parameters. The lack of empirical support prevents from applying these models for calculation of process characteristics of thermal water deaeration in spray sections of deaerators of atmospheric pressure. The authors have the aim to develop such an empirical support in the article.

Materials and methods: Model identification is made according to the results of experimental researches of deaeration processes in two devices, which include four distinguished in construction and operation conditions spray sections. Empirical support includes the determination method of effective area of phase contact surface in spray stream as well as written equalizations in non-dimensional aspect for calculating the coefficient of heat and mass transfers.

Results: The authors provide the values of identification parameters of the matrix mathematical models of thermal water deaeration in spray sections of deaerators of atmospheric pressure. This mathematical model describes the processes of water heating in spray stream with the water vapour condensation from the moving gas-vapor mixture and desorption of dissolved oxygen. The authors prove that the matrix model combined with the received parameters of its identification allows to calculate the water temperature and concentration of dissolved oxygen outside the spray sections of deaerators of atmospheric pressure with accuracy of 10,8 % of heat exchange calculation, and 17,2% of oxygen desorption calculation.

Conclusions: The developed model can be used for calculating heat-mass exchange processes with thermal water deaeration in designing problems of spray deaerators of atmospheric pressure and security adjustment of operated devices of this type.

Key words: thermal deaerators, spray section, heat transfer in condensation process, oxygen desorption.

Эффективность работы тепломассообменного аппарата зависит от его конструктивного исполнения и режима работы. Настройка режима работы деаэратора заданной конструкции на практике производится в ходе натурных испытаний, требующих определенных материальных и трудовых ресурсов. Затраты этих ресурсов могут быть сокращены при использовании компьютерных программ, обеспечивающих возможность расчета показателей работы деаэраторов с требуемой точностью, в том числе, при изменении конструкции.

Создание математической модели деаэратора в целом предполагает наличие моделей отдельных струйных и барботажных элементов. Количество таких отдельных элементов в деаэраторах современных конструкций может достигать десяти, а схема их соединения по потокам воды и греющего пара предусматривать рециркуляцию, объединение и разделение потоков. Однако даже при наличии адекватных моделей каждого элемента в отдельности при изменении конструкции аппарата каждый раз приходится «вручную» корректировать программные коды, описывая сложные взаимосвязи между элементами по потокам теплоносителей.

Указанная проблема разработки прикладных расчетных программ может быть решена при переходе к универсальным математическим моделям элементов, разработанным в рамках матричной формализации расчета тепломассообменных систем со сложной конфигурацией потоков [1].

Математическая модель теплообмена и десорбции растворенного кислорода в деаэраторе представлена системой дифференциальных уравнений, которые описывают изменение температуры воды, расхода пара и расхода воды, концентрации кислорода в водяной и паровой фазах вдоль поверхности контакта фаз F [1]:

$$\begin{cases} \frac{d\tau}{dF} = -\frac{k\tau}{c_2^* \tilde{G}_2} - \frac{k\tau^2}{r_1 \tilde{G}_2}, \\ \frac{d\tilde{G}_1}{dF} = -\frac{k\tau}{r_1}, \\ \frac{d\tilde{G}_2}{dF} = -\frac{d\tilde{G}_1}{dF}, \\ \frac{dc_{g1}}{dF} = \frac{k_m(k_g c_{g2} - c_{g1})}{\tilde{G}_1}, \\ \frac{dc_{g2}}{dF} = -\frac{k_m(k_g c_{g2} - c_{g1})}{\tilde{G}_2}, \end{cases} \quad (1)$$

где τ – температурный напор; k – коэффициент теплопередачи; c^* – удельная теплоемкость; r – удельная теплота парообразования; c_g – концентрация газа; k_m – коэффициент массопередачи по рассматриваемому газовому ком-

поненту; k_g – коэффициент фазового равновесия, определяющий связь между концентрацией газа в воде и равновесной концентрацией газа в паровой фазе; нижний индекс 1 относится к горячему теплоносителю; 2 – к холодному; n – к состоянию насыщения.

Баланс аддитивных характеристик потоков позволяет представить расчетное уравнение процесса для систем со сложной конфигурацией потоков в матричном виде [1]:

$$\begin{pmatrix} -I & K_{12}B_2 & \dots & K_{1n}B_n \\ K_{21}B_1 & -I & \dots & K_{2n}B_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1}B_1 & K_{n2}B_2 & \dots & -I \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} [X]_1 \\ [X]_2 \\ \vdots \\ [X]_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -[X_{ex}]_1 \\ -[X_{ex}]_2 \\ \vdots \\ -[X_{ex}]_n \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где B – матрица процесса в ступени; K – матрица коммутации; X – вектор аддитивных параметров; I – единичная матрица; индекс «ex» указывает на внешний поток, подаваемый на вход ступени.

При известных матрицах B и K решение системы (2), которая для целого ряда практически важных случаев является системой линейных уравнений, позволяет определить значения параметров теплоносителей в любой точке установки. Авторы подхода дают простые рекомендации относительно порядка решения задачи в рамках матричной формализации [1]. При этом не только вычисления, но и предшествующее составление всех матриц хорошо поддаются автоматизации (формализации), что и требуется для решения поставленной выше задачи автоматизированного синтеза математической модели деаэратора на основе моделей его отдельных элементов.

Рассмотренная математическая модель требует идентификации – для элементов остаются неизвестными площадь поверхности контакта фаз F , коэффициент теплопередачи k и коэффициент массопередачи k_m . Проблема связана с тем, что опубликованные модели струйных и барботажных элементов деаэраторов [2] традиционно представлены в статистическом виде и обычно устанавливают зависимость непосредственно изменения температуры воды или концентрации растворенного в ней кислорода в элементе от каких-либо параметров. То есть такие модели не позволяют рассчитать собственно значения коэффициентов тепло- и массопередачи.

Анализ опубликованных данных [2] показывает, что наиболее сложными с точки зрения математического моделирования являются струйные отсеки деаэраторов. Ранее нами проведены испытания деаэраторов ДСА-300 и

ДА-300м с отбором проб воды из внутренних элементов [3]. По результатам работы предложены критериальные уравнения, обеспечивающие расчет процессов нагрева воды и десорбции из нее кислорода для условий работы струйных отсеков при струйно-капельном гидродинамическом режиме [4]:

$$\lg\left(\frac{t_H - t_1}{t_H - t_2}\right) = 0,0137 \left(\frac{H}{d}\right)^{0,982} \text{Lap}^{0,163} \times \times \text{Fr}^{-0,054} \text{Pr}^{-0,832} \text{K}^{-0,290}, \quad (3)$$

$$\lg\left(\frac{C_1}{C_2}\right) = 0,8910 \left(\frac{H}{d}\right)^{0,964} \text{Lap}^{0,264} \text{Sc}^{-1} \text{K}^{-0,882}, \quad (4)$$

$$\text{Lap} = \frac{\rho_{\text{ж}} W_{\text{п}}^2 d}{\sigma_{\text{ж}}}, \quad \text{Fr} = \frac{W_{\text{ж}}^2}{gd}, \quad \text{Pr} = \frac{\nu_{\text{ж}}}{a_{\text{ж}}},$$

$$\text{K} = \frac{r}{c_{\text{ж}}(t_2 - t_1)}, \quad \text{Sc} = \frac{\nu_{\text{ж}}}{D_{\text{ж}}}, \quad W_{\text{ж}} = \frac{4G_{\text{ж}}^{\text{ex}}}{\pi d^2 n \rho_{\text{ж}}^{\text{ex}}},$$

$$W_{\text{п}} = \frac{W_{\text{п}}^{\text{ex}} - W_{\text{п}}^{\text{был}}}{2,3 \lg \frac{W_{\text{п}}^{\text{ex}}}{W_{\text{п}}^{\text{был}}}} \quad \text{при } W_{\text{п}}^{\text{ex}} / W_{\text{п}}^{\text{был}} \geq 1,7,$$

$$W_{\text{п}} = \frac{W_{\text{п}}^{\text{ex}} + W_{\text{п}}^{\text{был}}}{2} \quad \text{при } W_{\text{п}}^{\text{ex}} / W_{\text{п}}^{\text{был}} < 1,7,$$

$$W_{\text{п}}^{\text{ex}} = \frac{D_{\text{п}}^{\text{ex}} \nu_{\text{п}}^{\text{ex}}}{\Omega_{\text{ex}}}, \quad W_{\text{п}}^{\text{был}} = \frac{D_{\text{п}}^{\text{был}} \nu_{\text{п}}^{\text{был}}}{\Omega_{\text{был}}},$$

где t_1, t_2 – температура воды на входе и выходе струйного отсека соответственно, °С; t_H – температура насыщения пара в отсеке, °С; c_1 и c_2 – концентрации растворенного в воде кислорода на входе и выходе струйного отсека соответственно (проба при 25 °С), мг/дм³; Lap, Fr, Pr, K и Sc – критерии Лапласа, Фруда, Прандтля, Кутателадзе и Шмидта соответственно; H – высота отсека от нижней поверхности струеобразующей тарелки до борта нижней тарелки, м; d – диаметр отверстий струеобразующей тарелки, м; $\rho_{\text{ж}}$ – средняя плотность воды, кг/м³; $W_{\text{п}}$ – средняя скорость парового потока в отсеке, м/с; $\sigma_{\text{ж}}$ – средний коэффициент поверхностного натяжения воды, Н/м; $W_{\text{ж}}$ – средняя скорость истечения воды из отверстий струеобразующей тарелки, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\nu_{\text{ж}}$ – коэффициент кинематической вязкости воды, м²/с; $a_{\text{ж}}$ – коэффициент температуропроводности воды, м²/с; r – скрытая теплота парообразования, кДж/кг; $c_{\text{ж}}$ – истинная изобарная теплоемкость воды, кДж/(кг·°С); $D_{\text{ж}}$ – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воде, м²/с; $G_{\text{ж}}^{\text{ex}}$ – массовый расход воды на входе в отсек, кг/с; n – число отверстий струеобразующей тарелки, шт.; $\rho_{\text{ж}}^{\text{ex}}$ – плотность воды на входе в струйный отсек, кг/м³; $W_{\text{п}}^{\text{ex}}, W_{\text{п}}^{\text{был}}$ – скорости парового потока во входном и выходном сечениях отсека соответственно, м/с; $\nu_{\text{п}}^{\text{ex}}$ и $\nu_{\text{п}}^{\text{был}}$ –

удельные объемы пара во входном и выходном сечениях отсека соответственно, м³/кг; Ω_{ex} и $\Omega_{\text{был}}$ – площади проходного сечения на входе и выходе пара из отсека соответственно, рассчитанные через высоту отсека H , за вычетом площади, занимаемой условными струями воды постоянного по высоте диаметра d , м².

Критериальные уравнения (3) и (4) характеризуются высокими показателями точности по сравнению с ранее опубликованными моделями струйных отсеков, что позволяет рекомендовать их для расчетов [3, 4]. Однако полученные в таком виде уравнения не могут быть использованы в модели (2), поскольку не позволяют рассчитать в явном виде значения коэффициентов теплопередачи k и массопередачи k_m .

В целях получения расчетных зависимостей для коэффициентов k и k_m проведена специальная обработка результатов испытаний деаэраторов ДСА-300 и ДА-300м. Порядок определения расходов, теплофизических и химических характеристик теплоносителей на входе и выходе каждого струйного отсека подробно описан ранее [3, 4] и поэтому здесь не приводится.

Значения искомых коэффициентов k и k_m определяются по минимальному рассогласованию между экспериментальными и рассчитанными согласно (2) значениями выходных параметров. При определении коэффициента теплопередачи таким выходным параметром являлась температура воды на выходе из отсека, а при определении коэффициента массопередачи – концентрация компонента в воде на выходе из струйного отсека.

При идентификации модели (2) с определением коэффициентов k и k_m площадь поверхности контакта фаз в струйном отсеке F должна быть известна. Анализ опубликованных данных по гидродинамике в струйных отсеках теплообменных аппаратов [2, 5] позволил выбрать базовое расчетное выражение для определения искомой площади $F_{\text{срп}}$, м², справедливое для чисто струйного режима течения воды в отсеке:

$$F_{\text{срп}} = \frac{2\pi d W_{\text{ж}}^2}{3\mu^{3/2} g} \left[\left(1 + \frac{2\mu^2 g L}{W_{\text{ж}}^2} \right)^{3/4} - 1 \right], \quad (5)$$

$$L = 3W_{\text{ж}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}}^{\text{ex}} d^3}{\sigma_{\text{ж}}}}, \quad (6)$$

где μ – коэффициент расхода, принимаемый равным 0,75 при диаметре отверстий тарелки 5–8 мм и толщине этой тарелки 4–6 мм [2, 5]; L – средняя высота зоны чисто струйного режима течения воды в отсеке, м.

Все режимы работы струйных отсеков рассматриваемых деаэраторов являются

струйно-капельными [3, 4]. В таких условиях выражение (5), примененное в целом к высоте отсека H , дает заниженные значения F . При определении площади поверхности контакта фаз предложен следующий подход. Площадь поверхности контакта определяется как сумма площадей поверхности струй и поверхности капель. Длина и площадь поверхности струй определяются согласно (5), (6). Для определения площади поверхности капель в выражение (5) вводится поправочный коэффициент, диапазон значений которого по результатам специального анализа фотографических изображений составил от 1,4 до 1,6, а вместо длины струй L используется высота зоны капельного режима $(H - L)$.

Полученные в результате обработки данные позволили записать критериальные уравнения, обеспечивающие расчет искомых параметров идентификации k и k_m :

$$Nu = \exp(15,021) \left(\frac{H}{d}\right)^{-1,594} Lap^{0,046} \times Fr^{0,288} Pr^{-1,833} K^{-0,865}, \quad (7)$$

$$Sh = \exp(5,044) \left(\frac{H}{d}\right)^{0,897} Lap^{0,318} \times Fr^{0,468} Sc^{-0,413} K^{-0,802}, \quad (8)$$

$$Nu = \frac{kd}{\lambda_{ж}}, \quad Sh = \frac{k_m d}{D_{ж\rho_{ж}}},$$

где Nu , Sh – критерии Нуссельта и Шервуда соответственно; k – средний по поверхности контакта фаз коэффициент теплопередачи в отсеке, Вт/(м²К); $\lambda_{ж}$ – средний в отсеке коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К); k_m – средний по поверхности контакта фаз коэффициент массопередачи по растворенному кислороду в отсеке, кг/(м²с).

Выраженные в процентах среднеквадратические отклонения, характеризующие точность предложенных уравнений (7) и (8), составили: для модели теплообмена $\pm 10,8\%$ (рис. 1); для модели десорбции кислорода $\pm 17,2\%$ (рис. 2).

Для полученных ранее уравнений (3) и (4) эти показатели составили $\pm 1,8$ и $\pm 8,2\%$ соответственно. Сравнение показателей точности моделей (3), (4) и (7), (8) позволяет сделать вывод, что внесение в модель дополнительной неопределенности в виде площади поверхности контакта фаз F привело к заметному ухудшению точности. Однако полученные показатели точности уравнений (7), (8) в целом характерны для критериальных уравнений, описывающих процессы конденсации и испарения [5].

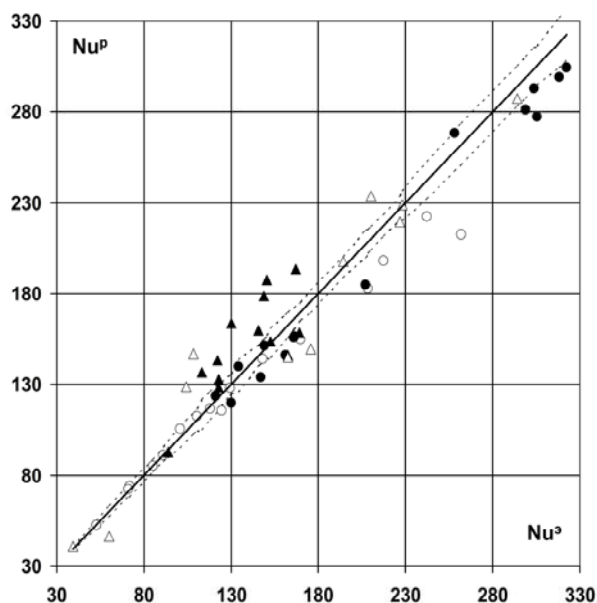


Рис. 1. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений критерия Нуссельта: Nu^e и Nu^p – экспериментальные и расчетные значения критерия Нуссельта соответственно; сплошная линия – совпадение экспериментальных и расчетных значений; пунктирные линии – границы 95 %-го доверительного интервала, обусловленного погрешностью измерения параметров в условиях каждого опыта; точки – результаты расчета по разработанному критериальному уравнению: \circ и \bullet – первая и вторая по ходу воды зоны верхнего струйного отсека деаэратора ДА-300м соответственно; \blacktriangle и \triangle – верхний и нижний струйные отсеки деаэратора ДСА-300 соответственно

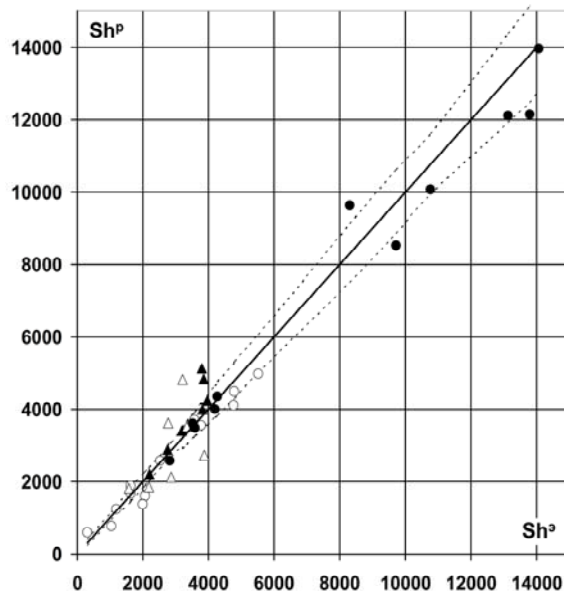


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений критерия Шервуда: Sh^e и Sh^p – экспериментальные и расчетные значения критерия Шервуда соответственно; прочие обозначения аналогичны обозначениям на рис. 1

Полученные уравнения (7), (8), как и уравнения (3), (4), справедливы при следующих параметрах, обеспеченных испытаниями: диаметр отверстий струеобразующей тарелки от 0,006 до 0,01 м; высота струйного отсека от

0,3 до 0,95 м; среднее абсолютное давление пара в отсеке от 109 до 137 кПа; средняя скорость истечения воды из отверстий струеобразующей тарелки от 0,2 до 3,0 м/с; средняя скорость пара в отсеке от 0,8 до 48,2 м/с.

Нужно отметить, что определяемые по уравнениям (7), (8) коэффициенты теплопередачи k и массопередачи k_m не следует рассматривать как истинные, поскольку их значения в условиях опытов определялись не только характеристиками собственно процесса, но и значениями площади поверхности контакта фаз F , которые являются условными.

Несмотря на ухудшение прогностических свойств уравнений (7), (8) по сравнению с уравнениями (3), (4), обеспечена возможность их использования в модели (2), что, в свою очередь, открывает возможность автоматического учета изменений конструкции деаэрата в компьютерной программе, то есть создания систем автоматизированного проектирования деаэраторов.

Список литературы

1. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических теплообменных установок / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 176 с.

2. Шарапов В.И., Цюра Д.В. Термические деаэраторы. – Ульяновск: Ульян. гос. техн. ун-т., 2003. – 560 с.

Мошкарин Андрей Васильевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,
Заслуженный деятель науки Российской Федерации, Почетный работник высшего профессионального образования России, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тепловых электрических станций

Барочкин Евгений Витальевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефон (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Жуков Владимир Павлович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 202,
телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov@home.ivanovo.ru

Ледуховский Григорий Васильевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефон (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru

Коротков Александр Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,
старший преподаватель кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефон (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

3. Экспериментальные исследования и моделирование технологических процессов атмосферной струйно-барботажной деаэрации воды / А.В. Мошкарин, В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский и др. // Теплоэнергетика. – 2010. – № 18. – С. 21–25.

4. Ледуховский Г.В. Совершенствование технологии десорбции кислорода в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного давления: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14. – Иваново, 2008. – 226 с.

5. Кутателадзе С.С. Теплопередача при конденсации и кипении. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит., 1952. – 231 с.

References

1. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok* [Systems Analysis of power engineering heat and mass exchange units], Ivanovo, 2009, 176 p.

2. Sharapov, V.I., Tsyura, D.V. *Termicheskie deaeratory* [Thermal Deaerators], Ulyanovsk: UGTU, 2003, 560 p.

3. Moshkarin, A.V., Vinogradov, V.N., Ledukhovskiy, G.V., Korotkov, A.A., Barochkin, A.E. *Teploenergetika*, 2010, issue 8, pp. 21–25.

4. Ledukhovskiy, G.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii desorbtsii kisloroda v struyno-barbotazhnykh deaeratorakh atmosfernogo davleniya* [Technological Development of Oxygen Desorption in Spray-bubble Atmospheric Deaerators], dis. ... kand. tekhn. nauk, 05.14.14., Ivanovo, 2008, 226 p.

5. Kutateladze, S.S. *Teploperedacha pri kondensatsii i kipenii* [Heat Transfer in Condensation and Boiling], Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noy literatury, 1952, 231 p.