

Balagurov Ivan Aleksandrovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Post-Graduate Student of the Applied Mathematics Department,
e-mail: ibalagurov@bk.ru

Berthiaux Henri,
Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, France,
Dr.-Eng., Professor
e-mail: berthiau@enstimac.fr

Зайцев Виктор Александрович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»,
доктор технических наук, профессор кафедры технической кибернетики и автоматике,
e-mail: z-viktor-a@mail.ru
Zaitsev Viktor Aleksandrovich,
Ivanovo State University of Chemistry and Technology,
Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of the Engineering Cybernetics and Automatics,
e-mail: z-viktor-a@mail.ru

УДК 621.165

Разработка математической модели многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях

К.А. Касаткин, А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Г.Г. Орлов
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Из литературных источников известны модели многопоточных теплообменных аппаратов без учета возможного в них фазового перехода в теплоносителях. Однако в ряде случаев, например в многопоточных теплообменных аппаратах, предназначенных для утилизации влаги и тепловой энергии дымовых газов тепловых электрических станций, водяные пары при конденсации меняют фазовое состояние. Отсутствие методов расчета таких аппаратов во многом сдерживает разработку и реализацию обоснованных технологических решений. Таким образом, развитие моделирования многопоточных теплообменных аппаратов на случай описания фазового перехода в теплоносителях является актуальной задачей для энергетической и смежных отраслей промышленности.

Материалы и методы. Построение модели для многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях выполнено в виде системы дифференциальных уравнений, составленных на основе теплового баланса для каждого потока теплоносителя. Аналитическое решение системы линейных дифференциальных уравнений получено методом пробных функций, численное решение этой же системы найдено методом Рунге-Кутты.

Результаты. Разработано математическое описание многопоточного теплообменного аппарата с учетом фазового перехода в теплоносителях. Найдены и проанализированы аналитические и численные решения для контактного теплообменного аппарата, используемого для утилизации влаги и тепловой энергии из дымовых газов тепловых электрических станций. Показаны возможности проведения проектных расчетов в рамках предложенной модели.

Выводы. Разработанная математическая модель служит основой для создания более эффективных методов организации процессов теплопередачи в технологических установках различного назначения с произвольным числом теплоносителей с учетом фазового перехода в теплоносителях.

Ключевые слова: теплопередача, поток теплоносителей, фазовый переход, модель многопоточных теплообменников, аналитическое решение, численное решение

Development of a mathematical model of multi-current heat exchangers taking into account phase transition in heat carriers

K.A. Kasatkin, A.E. Barochkin, V.P. Zhukov, G.G. Orlov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Abstract

Background. The models of multi-flow heat exchangers described in literature sources do not take into account possible phase transition in heat carriers. However, in a number of cases, for example, in multi-flow heat exchangers for utilization

of moisture and thermal energy from flue gases at thermal power plants, condensing water vapor changes the phase state. The fact that there are no methods for calculating such devices puts the brakes on the development of effective technological solutions. Thus, the development of modeling of multi-flow heat exchangers for describing the phase transition in the heat carriers is an urgent problem for the energy and related industries.

Materials and methods. The model for multi-flow heat exchangers taking into account the phase transition in heat carriers has been constructed as a set of differential equations based on the heat balance for each of the heat carrier flows. The analytical solution to the system of the linear differential equations was obtained by the trial function method, the numerical solution to the same system was found by the Runge-Kutta method.

Results. We have developed a mathematical description of a multi-flow heat exchanger taking into account the phase transformation in heat carriers. We have also found and studied analytical and numerical solutions for the contact heat exchanger for moisture and heat energy utilization from flue gases of TPPs, and shown the possibilities of making design calculations in the framework of the proposed model.

Conclusions. The developed mathematical model can be used as the basis for more efficient methods of organizing heat transfer processes in technological equipment used for various purposes with an arbitrary number of heat carriers taking into account phase transition in them.

Key words: heat transfer, heat carrier flow, phase transition, multi-flow heat exchanger model, analytical solution, numerical solution

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.5.061-067

Введение. Под многопоточными теплообменными аппаратами будем понимать теплообменники с числом теплоносителей больше двух. Ранее нами [1] рассмотрена задача описания многопоточных теплообменных аппаратов поверхностного типа без учета возможного фазового перехода в теплоносителях. Ниже предлагается развитие данного подхода на случай описания фазового перехода в теплоносителях применительно к контактному теплообменнику, предназначенным для утилизации влаги и тепловой энергии дымовых газов ТЭС [2–6]. Влажность дымовых газов в зависимости от вида сжигаемого топлива и его начальной влажности колеблется от 10 до 238 г/кг с.г. Теплота конденсации водяных паров в дымовых газах составляет от 1 до 21 % теплоты сгорания топлива [7]. Следует отметить, что снижение температуры уходящих газов при сжигании серосодержащих видов топлива во многом сдерживается конденсацией водяных паров из дымовых газов с образованием серной кислоты⁴, которая вызывает интенсивную коррозию тракта уходящих газов. Исследования, представленные ниже, в первую очередь актуальны для котельных установок, сжигающих газ с низким содержанием серы.

Для утилизации влаги из дымовых газов необходим перевод водяных паров в жидкое состояние. Многопоточность теплообменного аппарата в данном случае обуславливается наличием как минимум трех теплоносителей: сухих дымовых газов, водяных паров и охлаждающей воды. В энергетике решение проблемы утилизации влаги и тепловой энергии дымовых газов ТЭС во многом сдерживается отсутствием инженерных методов расчета многопоточных теплообменных аппаратов с возможным фазовым переходом в теплоносителях [2, 8–13]. Та-

ким образом, моделирование многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях является актуальной задачей для энергетики.

Объектом исследования является теплообменный аппарат, предназначенный для охлаждения газов и конденсации водяных паров дымовых газов ТЭС.

Предметом исследований является математическая модель и метод расчета многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях.

Целью исследования является моделирование многопоточного процесса теплообмена с учетом возможного фазового перехода в теплоносителях для определения наиболее эффективных конструкций и режимов работы теплообменных установок для утилизации влаги дымовых газов ТЭС.

Методы исследования. Для исследования процесса многопоточной теплопередачи используются методы математического моделирования, для решения полученной в ходе моделирования системы дифференциальных уравнений применяются методы высшей и прикладной математики.

Эскиз контактного теплообменного аппарата с указанием направления потоков движения теплоносителей представлен на рис. 1. Следует отметить, что в зависимости от потребности электрической станции в воде и тепловой энергии через установку может пропускаться как весь дымовой газ, так и какая-то его часть [3].

Направления движения потоков дымовых газов, водяных паров, охлаждающей воды и конденсата показаны на рис. 1 стрелками. Движение охлаждающей воды условно изображено на эскизе в виде струй, хотя на самом деле вода в разных типах контактных аппаратов может разбрызгиваться в виде капель или стекать в виде пленки.

⁴ Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – СПб.: ЦКТИ, 1998. – 258 с.

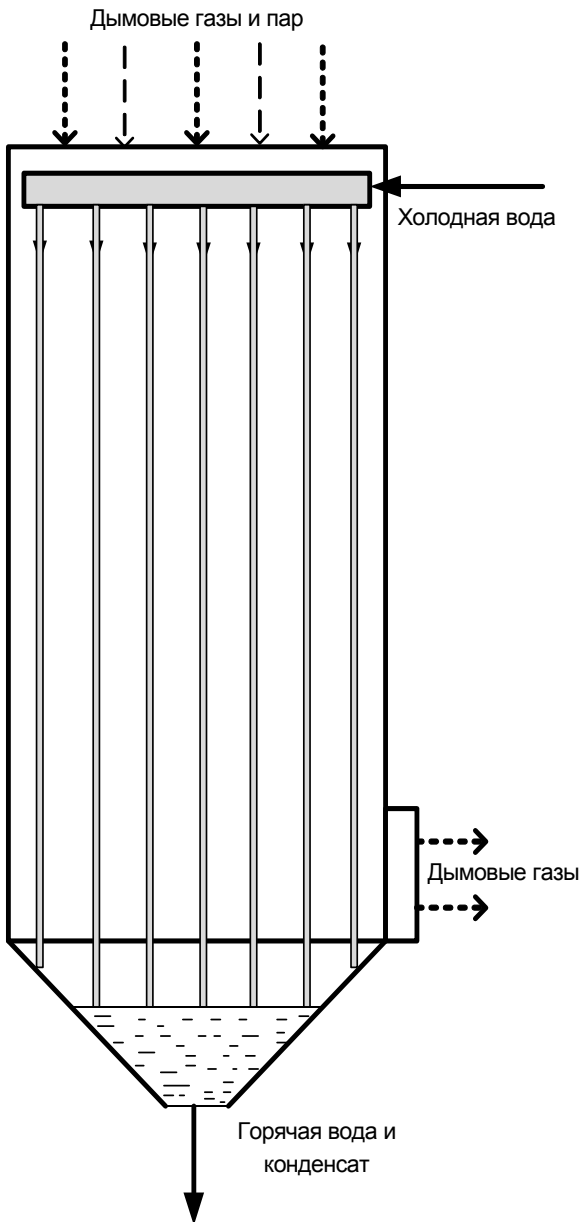


Рис. 1. Эскиз многопоточного контактного теплообменника с указанием направления движения потоков теплоносителей

В модели вид поверхности раздела фаз обуславливает подход для определения площади теплообмена. При разработке математической модели выделяются три теплоносителя: дымовые газы, водяные пары и охлаждающая вода. Обычно при технологических расчетах [2] дымовые газы и водяные пары рассматриваются как один поток в виде смеси газов с усредненными параметрами. Однако при таком модельном представлении сложно отследить кинетику конденсации водяных паров в указанной смеси, так как один компонент (водяные пары) меняет свое фазовое состояние, а второй компонент (сухие дымовые газы) не меняет своего фазового состояния. Выделение водяных паров в отдельный поток позволяет раздельно описывать конденса-

цию водяных паров и охлаждение дымовых газов в рамках единого подхода.

Для построения модели разработана расчетная схема процесса, представленная на рис. 2 с указанием направления движения потоков теплоносителей. Рассматривается стационарный установившийся процесс теплопередачи, т. е. переходные процессы не учитываются. В качестве определяющей координаты процесса выбрана площадь поверхности теплообмена F , направление оси для которой показано на рис. 2. Считается, что каждый теплоноситель движется по своему каналу, соответственно смешения потоков в ходе процесса теплообмена не происходит, а сразу на выходе из аппарата потоки конденсата и охлаждающей воды смешиваются. То есть процессы теплообмена и массообмена условно разбиваются на два последовательно протекающих процесса: сначала описывается процесс теплообмена, затем моделируется процесс массообмена путем смешивания полученного конденсата с охлаждающей водой. С учетом того, что теплота конденсации на два–три порядка выше теплоемкости воды, такое допущение приемлемо для проведения инженерных расчетов [14].

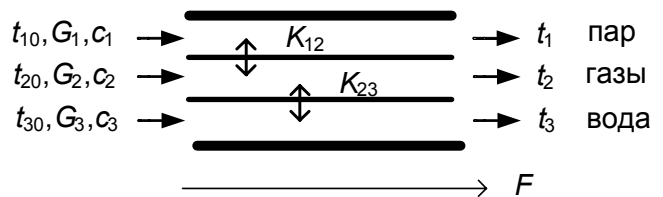


Рис. 2. Расчетная схема трехпоточного теплообменного аппарата с указанием направления движения потоков теплоносителей и потоков передачи тепловой энергии

При построении модели также считается, что теплообмен реализуется через поверхность теплообмена, которая в струйном контактно теплообменнике определяется как суммарная поверхность водяных струй.

Вывод системы дифференциальных уравнений для описания процесса многопоточной теплопередачи в аппарате поверхностного типа без фазового перехода в теплоносителях подробно рассмотрен нами ранее [1, 14, 15]. Изменение температуры для n теплоносителей вдоль поверхности теплообмена F описывается при этом системной из n однородных дифференциальных уравнений первого порядка. Для случая трех теплоносителей ($n = 3$) при отсутствии фазового перехода в теплоносителях вид указанной системы записывается следующим образом [18]:

$$\begin{cases} \frac{dt_1}{dF} = -a_1 t_1 + a_1 t_2, \\ \frac{dt_2}{dF} = a_2 t_1 - (a_2 + a_3) t_2 + a_3 t_3, \\ \frac{dt_3}{dF} = a_4 t_2 - a_4 t_3, \end{cases} \quad (1)$$

где t_1, t_2, t_3 – искомые температуры пара, сухих дымовых газов и охлаждающей воды соответственно; $a_1 = K_{12}/(c_1 G_1)$, $a_2 = K_{12}/(c_2 G_2)$, $a_3 = K_{23}/(c_2 G_2)$, $a_4 = K_{23}/(c_3 G_3)$; c – удельная теплоемкость; K – коэффициент теплопередачи; G – расход теплоносителя; одинарный индекс показывает номер теплоносителя, двойной индекс коэффициента теплопередачи соответствует номерам теплоносителей, между которыми происходит теплопередача.

Общее решение системы однородных дифференциальных уравнений (1) первого порядка ищется в виде [16]

$$\mathbf{T} = \sum_{j=1}^n C_j \alpha^j e^{\lambda_j F}, \quad (2)$$

где \mathbf{T} – вектор-столбец искомых температур; λ – собственные числа; α – собственные вектора матрицы \mathbf{A} , составленной из известных коэффициентов правых частей системы (1); C – постоянные интегрирования, значения которых определяются из начальных условий: $F = F_0$, $t_1 = t_{10}$, $t_2 = t_{20}$, $t_3 = t_{30}$.

Результаты аналитического решения системы (1) для тестового примера при начальных условиях $F_0 = 0$; $t_{10} = 110$ °С; $t_{20} = 110$ °С; $t_{30} = 30$ °С приведены на рис. 3 в виде графиков зависимости температуры теплоносителя от площади теплообмена. На этом же рисунке показаны результаты численного решения данной системы методом Рунге- Кутты 4 порядка [17].

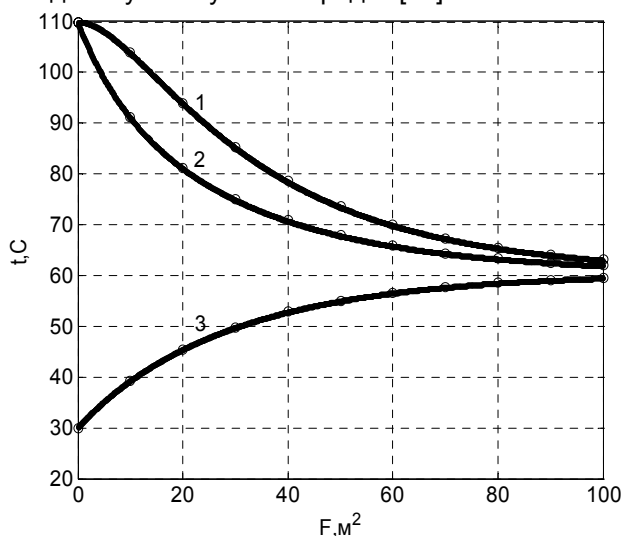


Рис. 3. Аналитические (точки) и численные (линии) зависимости температуры теплоносителя от площади теплообмена без учета фазового перехода в теплоносителях: 1 – пар; 2 – дымовые газы; 3 – охлаждающая вода

Сопоставление результатов численного и аналитического решений системы (1) показывает их практическое совпадение, что подтверждает правильность полученных решений, с одной стороны, и позволяет использовать любой из использованных методов для решения уравнений

модели, с другой. Анализ приведенных на рис. 3 зависимостей также показывает, что снижение температуры пара в рамках модели (1) происходит монотонно, т. е. модель (1) не описывает фазовый переход при конденсации пара, при котором обычно температура пара сохраняет практически постоянное значение. Кроме этого, температуры дымовых газов и пара (рис. 3) различаются, хотя в реальных условиях за счет интенсивного перемешивания в контактном теплообменнике такой разницы быть не должно. Для устранения указанных недостатков была разработана новая модель многопоточного теплообмена, которая позволяет учитывать фазовый переход в теплоносителе. Различия температуры дымовых газов и водяных паров были устранены подбором соответствующего коэффициента теплопередачи между этими теплоносителями. Новая модель была получена на основании тепловых балансов на элементарном участке теплообмена [14, 15]. Полученная система дифференциальных уравнений, описывающая фазовый переход в первом теплоносителе, записывается в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dF} = -\tilde{a}_1 t_{n1} + \tilde{a}_1 t_2, \\ \frac{dt_2}{dF} = a_2 t_{n1} - (a_2 + a_3) t_2 + a_3 t_3, \\ \frac{dt_3}{dF} = a_4 t_2 - a_4 t_3, \end{cases} \quad (3)$$

где $\tilde{a}_1 = K_{12}/(r \cdot G_1)$, r – удельная теплота парообразования; t_{n1} – температура насыщения воды и водяного пара [8]; x_1 – степень сухости пара, которая показывает массовую долю несконденсированного пара от исходной массы водяных паров в дымовых газах. Следует отметить, что модели (1) и (3) описывают изменение параметров теплоносителей в разных диапазонах значений температуры теплоносителя: первая до, а вторая после достижения паром температуры насыщения. При проведении компьютерных расчетов переход с одной модели на другую реализуется на уровне алгоритма при достижении паром состояния насыщения.

Для демонстрации прогностических возможностей модели рассматривается практический пример расчета утилизации влаги из дымовых газов применительно к блоку 800 МВт при сжигании природного газа. Значения расходов, теплоемкостей и начальных температур теплоносителей, которые были использованы при расчете, приведены в таблице.

Температура насыщения водяных паров дымовых газов при соответствующем парциальном давлении составила $t_{n1} = 46,9$ °С.

Исходные данные для расчетного примера

Параметр	Теплоноситель		
	водяной пар	дымовые газы	охлаждающая вода
Расход G , кг/с	20,6	657,2	2143,3
Теплоемкость c , Дж/кг К	2000	1000	4187
Температура на входе t , °С	67,6	67,6	40

Результаты исследования. Для проведения расчетных исследований разработаны алгоритм и компьютерная программа для его реализации в пакете Матлаб. Результаты расчетного анализа, проведенного в рамках предложенных моделей (1), (3), представлены на рис. 4 в виде зависимостей изменения температуры (рис. 4,а) и степени сухости (рис. 4,б) теплоносителей вдоль поверхности теплообмена. При достижении водяными парами температуры насыщения (рис. 4,а, кривая 1) происходит смена расчетной модели (1) на модель (3), при этом начинается конденсация водяных паров и температура водяных паров и газа практически перестает изменяться.

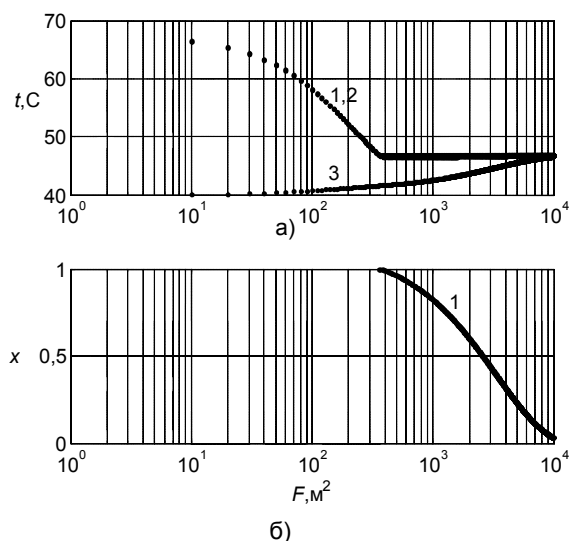


Рис. 4. Зависимости температуры теплоносителей (а) и степени сухости пара (б) от площади теплообмена с учетом фазового перехода при конденсации пара: 1 – пар и конденсат; 2 – дымовые газы; 3 – охлаждающая вода

Анализ зависимости на рис. 4,б позволяет определить поверхность теплообмена, при которой весь пар переходит в воду. Полученные результаты позволяют провести анализ эффективности процесса теплопередачи для рассмотренных условий охлаждения дымовых газов для обеспечения утилизации влаги в нужных объемах. Выполненный расчетный анализ показал, что найденное решение системы (3) позволяет отследить изменение температуры теплоносителей и долю сконденсированного пара в каждой точке теплообменника и тем самым выбрать кон-

струкцию и режимы функционирования контактного теплообменного аппарата. Следует отметить, что собственно вопросы проектирования аппарата и выбора технологических условий, которые обеспечивают необходимую площадь теплообмена, выходят за рамки данной статьи. Также следует отметить, что в представленной модели не учитывается возможное изменение температуры насыщения водяных паров за счет изменения парциального давления водяных паров при их конденсации. Оценку влияния указанного фактора на результаты расчета планируется выполнить путем позонного расчета контактного аппарата, считая для каждой зоны температуру насыщения постоянной.

Выводы. Предложенное математическое описание многопоточных теплообменных аппаратов в виде системы линейных дифференциальных уравнений позволяет учитывать фазовый переход в горячем теплоносителе. Анализ полученных результатов позволяет в свою очередь определить конструкцию теплообменного аппарата для получения нужного количества конденсата или заданного снижения температуры уходящих газов. Разработанная математическая модель служит основой для создания более эффективных методов организации процессов теплопередачи в технологических установках различного назначения с произвольным числом теплоносителей с учетом фазового перехода.

Список литературы

1. Барочкин А.Е., Жуков В.П. Моделирование и расчет многопоточных теплообменных аппаратов // Вестник ИГЭУ. – 2017. – № 3. – С. 70–75. doi: 10.17588/2072-2672.2017.3.070-075.
2. Седлов А.С., Солодов А.П., Бухонов Д.Ю. Получение конденсата из уходящих дымовых газов на экспериментальной установке ОАО ГРЭС-24 // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 5. – С. 76–77.
3. Беспалов В.В., Беспалов В.И. Технология осушения дымовых газов ТЭС с использованием теплоты конденсации водяных паров // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, № 4. – С. 56–59.
4. Аронов И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.
5. Установка утилизации тепла дымовых газов / Н.Ф. Свиридов, Р.Н. Свиридов, И.Н. Ивуков, Б.Л. Терк // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 8. – С. 29–31.
6. Галустов В.С. Утилизация теплоты дымовых газов // Энергия и менеджмент. – 2004. – № 6. – С. 44.
7. Белосельский Б.С., Соляков В.К. Энергетическое топливо. – М.: Энергия, 1980. – 168 с.
8. Андреев Е.И. Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 172 с.
9. Назмеев Ю.Г. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков реологически сложных сред. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – С. 67–94.
10. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.

11. Барановский Н.В., Коваленко Л.М., Ястребенецкий А.Р. Пластинчатые и спиральные теплообменники. – М.: Машиностроение, 1973. – 288 с.

12. Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 288 с.

13. Аронсон К.Э., Блинков С.Н., Брезгин В.И. Теплообменники энергетических установок: учебник для вузов. – Екатеринбург: Сократ, 2003. – 968 с.

14. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических теплообменников установок. – Иваново, 2009. – 176 с.

15. Барочкин А.Е., Жуков В.П., Беляков А.Н. Исследование процесса теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54, вып. 11. – С. 116–119.

16. Власов В.Г. Конспект лекций по высшей математике. – М.: Айрис, 1996. – 287 с.

17. Самарский А.А. Введение в численные методы. – СПб.: Лань, 2005. – 288 с.

References

1. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P. *Vestnik IGEU*, 2017, no. 3, pp. 70–75. doi: 10.17588/2072-2672.2017.3.070-075.

2. Sedlov, A.S., Solodov, A.P., Bukhonov, D.Yu. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2006, no. 5, pp. 76–77.

3. Bepalov, V.V., Bepalov, V.I. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2010, vol. 316, no. 4, pp. 56–59.

4. Aronov, I.Z. *Kontaktnyy nagrev vody produktami sgoraniya prirodnogo gaza* [Contact heating of water by natural gas combustion products]. Leningrad: Nedra, 1990. 280 p.

5. Sviridov, N.F., Sviridov, R.N., Ivukov, I.N., Terk, B.L. *Novosti teplosnabzheniya*, 2002, no. 8, pp. 29–31.

6. Galustov, V.S. *Energiya i menedzhment*, 2004, no. 6, p. 44.

7. Belosel'skiy, B.S., Solyakov, B.S. *Energeticheskoe toplivo* [Power fuel]. Moscow: Energiya, 1980. 168 p.

8. Andreev, E.I. *Raschet teplo- i massoobmena v kontaktnykh apparatakh* [Calculation of heat and mass transfer in contact devices]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 172 p.

9. Nazmееv, Yu.G. *Gidrodinamika i teploobmen zakruchennykh potokov reologicheskii slozhnykh sred* [Hydrodynamics and heat transfer of swirl flows of rheologically complex media]. Moscow: Energoatomizdat, 1996, pp. 67–94.

10. Isachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukomel, A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoatomizdat, 1981. 416 p.

11. Baranovskiy, N.V., Kovalenko, L.M., Yastrebenetskiy, A.R. *Plastinchatye i spiral'nye teploobmenniki* [Plate and spiral heat exchangers]. Moscow: Mashinostroenie, 1973. 288 p.

12. Nazmееv, Yu.G., Lavygin, V.M. *Teploobmennye apparaty TES* [Heat exchangers of thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 288 p.

13. Aronson, K.E., Blinkov, S.N., Brezgin, V.I. *Teploobmenniki energeticheskikh ustanovok* [Heat exchangers for power plants]. Ekaterinburg: Sokrat, 2003. 968 p.

14. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teploobmennyykh ustanovok* [System analysis of power heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.

15. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Belyakov, A.N. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2011, vol. 54, issue 11, pp. 116–119.

16. Vlasov, V.G. *Konspekt lektsiy po vyshey matematike* [An abstract of lectures on higher mathematics]. Moscow: Ayris, 1996. 287 p.

17. Samarskiy, A.A. *Vvedenie v chislennyye metody* [Introduction to numerical methods]. Saint-Petersburg: Lan', 2005. 288 p.

Касаткин Кирилл Андреевич,

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

адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34,

e-mail: vip_kirill16@mail.ru

Kasatkin Kirill Andreyevich,

Ivanovo State Power Engineering University,

A Master course student,

address: Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34,

e-mail: vip_kirill16@mail.ru

Барочкин Алексей Евгеньевич,

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

кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,

адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,

телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-13,

e-mail: acorp27@yandex.ru

Barochkin Aleksei Yevgenyevich,

Ivanovo State Power Engineering University,

Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Heat Power Plants Department,

address: Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, Building «V» (B), Room 408,

tel.: (4932) 41-60-56, 26-99-31, e-mail: acorp27@yandex.ru

Жуков Владимир Павлович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой прикладной математики,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 202,
телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru
Zhukov Vladimir Pavlovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Head of the Applied Mathematics Department,
address: Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, Building A, Room 202,
tel. (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Орлов Геннадий Георгиевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-13.
Orlov Gennady Georgievich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Heat Power Plants Department,
address: Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, Building «V» (B), Room 408,
tel.: (4932) 41-60-56, 26-99-31.