

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.165

Владимир Павлович Жуков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Алексей Евгеньевич Барочкин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Антон Николаевич Беляков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: ab_pm@mail.ru

Евгений Витальевич Барочкин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Елена Александровна Шуина

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой высшей математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-74, e-mail: barantseva77@mail.ru

Анатолий Константинович Соколов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры БЖД, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-96-45, e-mail: sokolov@bjd.ispu.ru

Математическое моделирование, оптимизация структуры и режима работы оборудования конденсационных котлов

Авторское резюме

Состояние вопроса. Снижение потерь тепла с уходящими газами энергетических установок является одним из перспективных направлений решения проблемы энергосбережения, которая относится к приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий РФ. Конструкции конденсационных теплоутилизаторов в промышленности и энергетике позволяют, наряду со снижением тепловых потерь с уходящими газами, значительно умень-

шить и потери влаги в атмосферу. Несмотря на большое количество научных публикаций по данной теме и положительный опыт применения разработанных конструкций конденсационных теплоутилизаторов, основная масса газовых котельных и ТЭС в настоящее время продолжают работать без внедрения установок глубокой утилизации тепла. Во многом это вызвано отсутствием универсальных методов расчета и оптимизации режимов теплоутилизаторов. В связи с этим разработка математических моделей энергетических установок с конденсационными теплоутилизаторами и пакетов программ для их компьютерной реализации в целях оперативного выбора оптимальной структуры и режима работы оборудования является актуальной задачей.

Материалы и методы. Для разработки модели конденсационного котла использованы уравнения баланса энергии и массы. Для решения задачи оптимального выбора структуры и режима работы оборудования применены методы математического программирования.

Результаты. Разработаны модель и метод решения задачи выбора оптимальной структуры и режима работы конденсационных теплоутилизаторов. В качестве целевой функции оптимизации предложено использовать количество топлива, необходимого для обеспечения заданной тепловой нагрузки. Разработана компьютерная программа для оптимального распределения нагрузки между работающими агрегатами.

Выводы. Анализ полученных результатов показал адекватное описание моделью реального оборудования и возможность построения компьютерных режимных карт, использование которых позволяет существенно экономить энергоресурсы за счет оптимального выбора режима и распределения нагрузки между работающим оборудованием. Предложенный подход позволяет формулировать и решать обратные задачи диагностики состояния оборудования конденсационных теплоутилизаторов.

Ключевые слова: конденсационный котел, режимная карта, оптимальный режим, диагностика состояния

Vladimir Pavlovich Zhukov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Postdoctoral degree), Professor, Head of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Alexey Evgenievich Barochkin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: acorp27@ya.ru

Anton Nikolaevich Belyakov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Postdoctoral degree), Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: ab_pm@mail.ru

Evgeny Vitalievich Barochkin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Elena Alexandrovna Shuina

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Postdoctoral degree), Professor, Head of Higher Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-74, e-mail: barantseva77@mail.ru

Anatoly Konstantinovich Sokolov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Postdoctoral degree), Professor of Health and Safety Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-96-45, e-mail: sokolov@bjd.ispu.ru

Mathematical modeling, optimization of structure and operating mode of condensing boiler equipment

Abstract

Background. One of the priority areas of the development of science, technology, and engineering in the Russian Federation is energy saving issues. One of the promising areas to solve the problem of energy saving is to reduce waste heat losses of power plants. The designs of condensing heat exchangers used in industry and energy sector allow both to reduce waste heat losses and to significantly reduce moisture losses. Despite the substantial number of scientific publications on this issue and the positive experience of using the developed designs of condensing heat exchangers, most gas boiler houses and thermal power plants currently continue to operate without deep heat recovery units. To a great extent, it is due to the lack of the universal methods to calculate and optimize heat exchanger modes. Thus, to effective selection of the optimal structure and operating mode of the equipment, the development of mathematical models of power plants with condensing heat exchangers and software packages for their computer implementation is an urgent task.

Materials and methods. To design a model of a condensing boiler, equations of energy and mass balances are used. To solve the problem of optimal choice of structure and operating mode of the equipment, mathematical programming methods are used.

Results. A model and a method to solve the problem of choosing the optimal structure and operating mode of condensation heat exchangers have been developed. As a target optimization function, it is proposed to use the amount of fuel required to provide pre-set heat load. A computer program has been developed for optimal distribution of load between operating units.

Conclusions. Analysis of the results obtained has showed an adequate description of real equipment model and the possibility to generate computer mode maps. Application of these maps allows significant savings of energy resources due to the optimal choice of mode and load distribution between operating equipment. The proposed approach allows us to formulate and solve inverse problems of diagnosing the state of condensing heat exchangers.

Key words: condensing boiler, mode map, optimal mode, condition diagnostics

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.6.082-087

Введение. Проблема энергосбережения и рационального природопользования отнесена указом президента к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации. Одним из путей решения данной проблемы в энергетической отрасли является использование конденсационных котлов, в которых за счет снижения температуры уходящих газов существенным образом снижаются потери влаги и тепловой энергии в атмосферу [1, 2]. Продукты сгорания природного газа содержат большое количество водяных паров и обладают значительным потенциалом для утилизации тепла. Полученный из уходящих газов конденсат водяных паров дополнительно может быть использован в тепловой схеме ТЭС как высококачественный теплоноситель, компенсирующий утечки рабочего тела в цикле. Решение задачи повышения эффективности функционирования конденсационного котла предлагается реализовать на основе его математической модели. Следует отметить, что механизм процесса тепло- и массообмена в конденсационных аппаратах весьма сложен. Здесь одновременно при изменении агрегатного состояния теплоносителей происходят процессы конвективного теплообмена и массообмена [3–5]. Большинство существующих методов расчета котельных установок [1, 2] основано на балансовых уравнениях по всему аппарату, где потоки теплоты и массы рассчитываются по некоторым средним значениям параметров состояния взаимодействующих сред. Это может приводить к значительным погрешностям, поскольку разность потенциалов переноса существенно меняется по ходу процесса и предсказать заранее характер этих изменений возможно далеко не всегда.

Целью исследования является разработка эффективных методов расчета и оптимизации технологических процессов тепломассообмена в конденсационном котле.

Метод и объект исследования. В качестве объекта исследования рассматривается газовый котел GEFFEN MB (рис. 1). Внешний вид котла [1] показан на рис. 1,а, продольный разрез котла с указанием направлений движения теплоносителей приведен на рис. 1,б. Смесь газа 1 и воздуха 2 через горелочную трубу подается в

камеру сгорания, где происходит преобразование химической энергии топлива в тепловую энергию дымовых газов 3. Проходя в межтрубном пространстве водной рубашки, газы за счет разности температур передают тепловую энергию охлаждающей воде. Подача 4 и отвод 5 охлаждающей воды осуществляются через соответствующие патрубки, показанные на рис. 1,б.

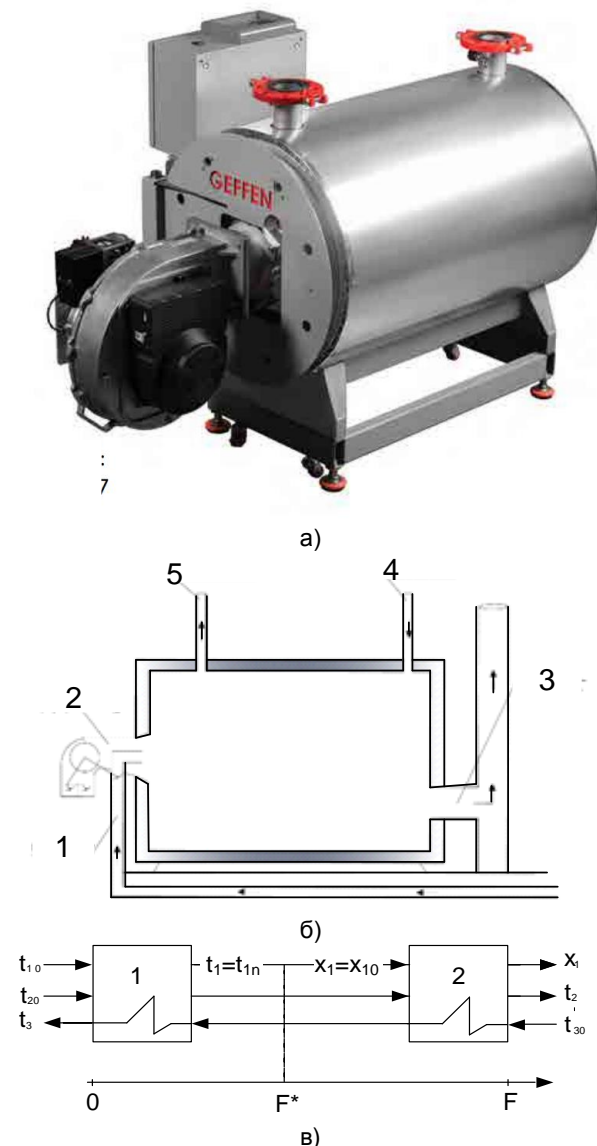


Рис. 1. Внешний вид (а), продольный разрез (б) котла GEFFEN MB и его расчетная схема с указанием направления потоков теплоносителей (в)

Для достижения цели исследования последовательно решаются две задачи:

1) разработка, идентификация и проверка адекватности модели тепломассообмена в конденсационном теплоутилизаторе;

2) выбор оптимальных режимов и состава работающего оборудования для различных внешних условий и нагрузок потребителей.

Расчетная схема модели процесса теплопередачи в конденсационном котле представлена на рис. 1, в. Для возможности описания конденсации водяных паров, содержащихся в уходящих газах, в расчетной схеме выделяются три потока теплоносителей: водяные пары, содержащиеся в дымовых газах; сухие дымовые газы и охлаждающая вода. Считается, что движение потоков водяных паров и дымовых газов по ступеням организовано в противоположном направлении по отношению к охлаждающей воде. В качестве определяющей координаты процесса выбирается площадь поверхности нагрева F , направление оси которой совпадает с направлением движения дымовых газов. Расчетная схема, представленная на рис. 1, в, включает две ступени: ступень охлаждения 1 и ступень конденсации водяных паров 2.

Для описания процессов теплообмена в камере охлаждения используется модель в виде системы трех дифференциальных уравнений [6] относительно температур трех теплоносителей вдоль определяющей координаты F : водяного пара (t_1), дымовых газов (t_2) и воды (t_3):

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

где $a_1 = k_{12}/(c_1 G_1)$, $a_2 = k_{12}/(c_2 G_2)$, $a_3 = k_{23}/(c_2 G_2)$, $a_4 = k_{23}/(c_3 G_3)$; одинарный индекс показывает номер теплоносителя; двойной индекс коэффициента теплопередачи соответствует номерам теплоносителей, между которыми происходит теплопередача; c – удельная теплоемкость; k – коэффициент теплопередачи; G – расход теплоносителя.

Конденсация водяных паров начинается при достижении состояния насыщения (t_{n1}) в точке с координатой $F = F^*$. Считается, что в процессе конденсации температура водяных паров не меняется, а состояние теплоносителя описывается степенью сухости или долей пара в пароводяной смеси x_1 . Для случая фазового перехода в горячем теплоносителе из баланса теплоты [6] получена система дифференциальных уравнений, описывающих изменение степени сухости водяного пара (x_1), температуры дымовых газов (t_2) и воды (t_3) вдоль поверхности теплообмена:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dF} = -\tilde{a}_1 t_{n1} + \tilde{a}_1 t_2, \\ \frac{dt_2}{dF} = a_2 t_{n1} - (a_2 + a_3) t_2 + a_3 t_3, \\ \frac{dt_3}{dF} = a_4 t_2 - a_4 t_3, \end{cases} \quad (2)$$

где $\tilde{a}_1 = k_{12}/(r_1 G_1)$; r – скрытая теплота парообразования; t_{n1} – температура насыщения водяного пара.

Для получения решения задачи теплообмена с учетом фазового перехода в первом теплоносителе решаются системы уравнений (1) и (2). Следует отметить, что модель (1)–(2) описывает изменение параметров теплоносителей в разных диапазонах температуры первого теплоносителя: первая до, а вторая после достижения паром температуры насыщения.

Модель конденсационного котла (1)–(2) при выполнении расчетного анализа решалась с помощью специально разработанного алгоритма и программы в системе Matlab. В рамках предложенного алгоритма в ходе решения уравнения (1) по достижении температуры насыщения водяными парами определялась координата начала фазового перехода, после этого расчет выполнялся согласно модели (2).

Для идентификации модели (1)–(2) использованы данные, полученные при проведении экспериментальных исследований газовых конденсационных котлов GEFEN MB 3.1-1000 ООО «Нижегородтеплогаз» (г. Дзержинск Нижегородской области): расход воды, газа и водяных паров через котел; температура воды на входе и выходе из котла; расход образовавшегося конденсата; температура уходящих газов. В качестве параметра идентификации определялся комплекс kF , равный произведению площади поверхности нагрева и коэффициента теплопередачи, который по своему смыслу аналогичен числу единиц переноса теплоты [7].

Для проведения идентификации выбран режим при практически полной конденсации водяных паров, значение параметра идентификации найдено при совпадении расчетного и измеренного показателей степени сухости водяных паров на выходе из котла. Результаты идентификации представлены на рис. 2 в виде зависимости температуры теплоносителей t и доли водяных паров x вдоль поверхности нагрева, представленной в виде комплекса kF , для трех потоков теплоносителей. Вертикальная штриховая линия соответствует достижению водяными парами температуры насыщения и началу процесса конденсации водяных паров ($x_1 = 1$). Для рассматриваемого при идентификации режима (34 % от номинальной нагрузки), которому соответствует практически полное извлечение влаги из дымовых газов, значение параметра идентифи-

кации определялось достижением нулевой расчетной степени сухости водяных паров ($x_1 = 0$). Найденное таким образом значение параметра идентификации составило $kF = 6087 \text{ Вт/С}^\circ$, а значения температур сетевой воды на входе и выходе котла совпадали с точностью погрешности измерения с замеренными результатами, что дополнительно подтверждает адекватность представленной модели.

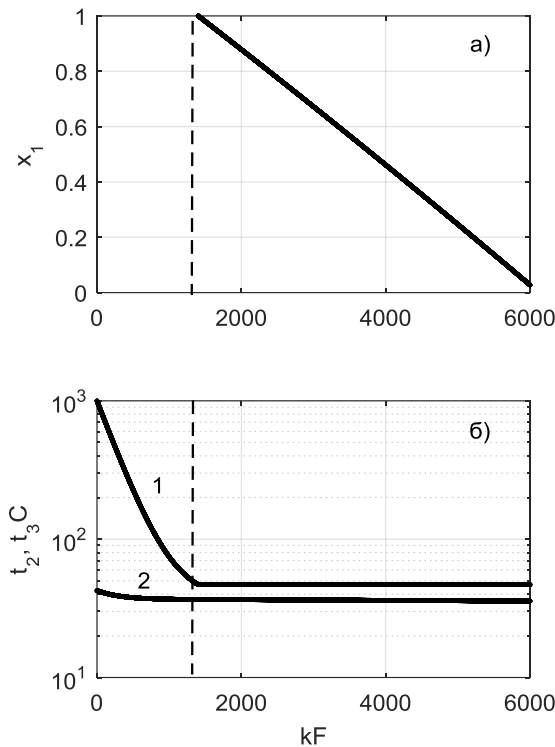


Рис. 2. Расчетные зависимости температуры t и доли водяных паров x вдоль поверхности нагрева для трех потоков теплоносителей: 1 – водяные пары и сухие дымовые газы; 2 – охлаждающая вода

Анализ полученных результатов позволяет определить границу начала фазового перехода и степень извлечения влаги из дымовых газов при различных режимах работы установки. Адекватность модели была проверена на экспериментальных данных, которые не были использованы при идентификации модели и послужили основой для построения режимных карт конденсационного котла, представленных на рис. 3 в виде зависимостей коэффициента полезного действия котла от нагрузки.

Хорошо известно, что конденсационные котлы наиболее эффективно работают при низких нагрузках. При повышении нагрузки конденсационный режим удается обеспечить далеко не всегда. Даже при достижении конденсационного режима доля извлечения влаги из дымовых газов может быть весьма незначительной.

Вторая задача по оптимальному распределению нагрузки на работающем оборудовании выполнена с учетом модели конденсацион-

ного котла, полученной на первом этапе. В качестве целевой функции при решении оптимизационной задачи выбирается минимальный расход тепла топлива, что при заданной теплоте сгорания топлива соответствует минимальному расходу топлива. В качестве параметров оптимизации рассматриваются структура (количество) включенных в работу конденсационных агрегатов и их тепловая нагрузка (режим работы каждого агрегата):

$$B = \sum_i \frac{Q_i}{\eta_i} \Rightarrow \min_{Q_i}, \quad (3)$$

где B – расход тепла топлива; Q_i – тепловая нагрузка i -го агрегата; η_i – КПД брутто котла (по высшей теплоте сгорания) [8]; n – число работающих агрегатов; i – номер агрегата ($i = \overline{1, n}$).

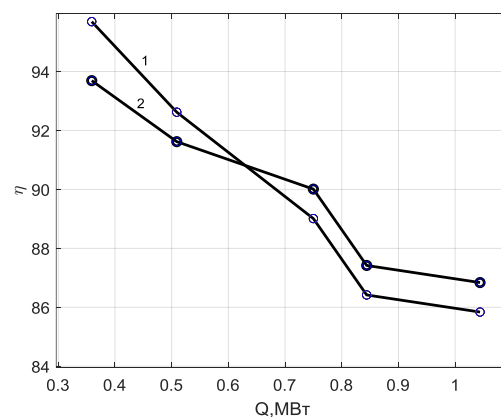


Рис. 3. Зависимости коэффициента полезного действия первого (1) и второго (2) конденсационного котла от тепловой нагрузки

Суммарная тепловая нагрузка, которую должна обеспечить установка, записывается в виде ограничения

$$Q = \sum_i Q_i. \quad (4)$$

В качестве демонстрационного примера решения поставленной задачи рассматривается энергетическая установка из двух конденсационных котлов. Решение оптимизационной задачи (3)–(4) для двух котлов выполнено методом перебора [9–11] и представлено в виде режимной карты оптимальной загрузки агрегатов при их совместной работе (рис. 4).

Режимная карта оптимальной загрузки, представленная для двух котлов с разной эффективностью работы, позволяет выбрать режимы работы каждого котла, обеспечивающие минимальный суммарный расход топлива при заданной общей тепловой нагрузке.

Расчетный анализ эффективности предлагаемого подхода выполнен для заданного примера годового графика нагрузок котельной (см. таблицу). В таблице приведены средние тепловые нагрузки потребителей и суммарная продолжительность в течение года T такой нагрузки.

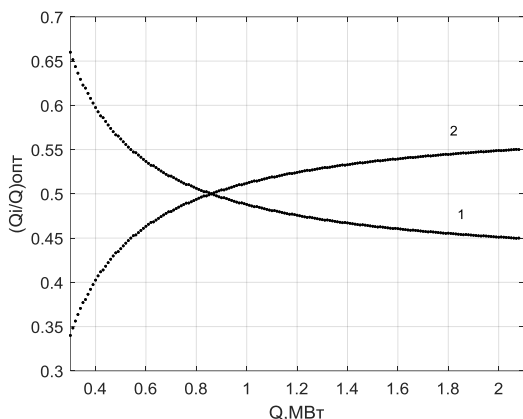


Рис. 4. Режимная карта оптимальной загрузки двух котлов с разной эффективностью. Цифры на графике соответствуют обозначениям рис. 3

Исходные данные для расчета: годовой график нагрузки котельной

Q, МВт	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5
T, час/год	1000	1500	1000	1500	1000

При оценке эффективности проанализированы два варианта: равномерное распределение нагрузки между работающими агрегатами и оптимальное распределение нагрузки между котлами. Исходные данные для расчета представлены в таблице, энергетические характеристики котлов соответствуют зависимостям, приведенным на рис. 3, оптимальное распределение нагрузки выбрано согласно графикам на рис. 4. Перерасход тепловой энергии при равномерном распределении нагрузок по сравнению с оптимальным режимом составил 256,67 ГДж/год, что соответствует годовой экономии топлива 5,579 т/год.

Выводы. Разработанная модель конденсационного котла позволяет формулировать и решать задачи оптимального выбора режима работающего оборудования, обеспечивающего минимальный расход топлива при заданной тепловой нагрузке. Найденное решение оптимального распределения нагрузки позволяет сэкономить за год 256,67 ГДж тепловой энергии, по сравнению с вариантом равномерного распределения нагрузки между котлами.

Предложенный подход может быть использован для диагностики состояния работающего оборудования и перехода от проведения планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по состоянию.

Список литературы

1. Котел отопительный водогрейный газовый типа GEFLEN MB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geffen.ru/>. (дата обращения: 10.09.2021).
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(43). – С. 76–77.
3. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.

4. 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.

5. Барочкин А.Е., Жуков В.П. Моделирование и расчет многопоточных теплообменных аппаратов // Вестник ИГЭУ. – 2017. – № 3. – С. 70–75.

6. Жуков В.П., Барочкин А.Е. Моделирование и расчет процесса теплопередачи в конденсационном котле // Энергосбережение и водоподготовка. – 2022. – № 2(136). – С. 43–48.

7. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 1 / пер. с англ.; под ред. О.Г. Мартыненко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.

8. Белосельский Б.С., Соляков В.К. Энергетическое топливо. – М.: Энергия, 1980. – 168 с.

9. Мэтьюз Д.Г., Финк К.Д. Численные методы. Использование MATLAB. – М.: Лань, 2001. – 720 с.

10. Волков Е.А. Численные методы: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2007. – 256 с.

11. Соловьев И.А., Червяков А.В., Репин А.Ю. Прикладная математика. Применение программной среды Python S60. – М., 2010. – 280 с.

References

1. Kotel otopitel'nyy vodogreynyy gazovyy tipa GEFLEN MB [Gas water heating boiler type GEFLEN MB]. Available at: <http://www.geffen.ru/>. (date of access: 09/10/2021).
2. Sedlov, A.S., Solodov, A.P., Buhonov, D.Yu. Poluchenie kondensata iz ukhodyashchikh dymovykh gazov na eksperimental'noy ustanovke ОАО GRES-24 [Obtaining condensate from exhaust flue gases at the experimental installation of ОАО GRES-24]. *Energoberezhnie i vodopodgotovka*, 2006, no. 5(43), pp.76–77.
3. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.
4. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Belyakov, A.N. Issledovanie protsessa teploperedachi v mnogopotchnyykh teplotobmennyykh apparatakh [Study of the heat transfer process in multi-flow heat exchangers]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2011, vol. 54, issue 11, pp. 116–119.
5. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P. Modelirovanie i raschet mnogopotchnyykh teplotobmennyykh apparatov [Modeling and calculation of multi-flow heat exchangers]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 3, pp. 70–75.
6. Zhukov, V.P., Barochkin, A.E. Modelirovanie i raschet protsessa teploperedachi v kondensatsionnom kotle [Modeling and calculation of the heat transfer process in a condensing boiler]. *Energoberezhnie i vodopodgotovka*, 2022, no. 2(136), pp. 43–48.
7. Martynenko, O.G. (ed.) *Spravochnik po teplotobmennikam v 2 t., t. 1* [Handbook of heat exchangers in 2 vols., vol. 1]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 560 p.
8. Belosel'skiy, B.S., Solyakov, V.K. *Energeticheskoe toplivo* [Energy fuel]. Moscow: Energiya, 1980. 168 p.
9. Met'yuz, D.G., Fink, K.D. *Chislennyye metody. Ispol'zovanie MATLAB* [Numerical methods. Using Matlab]. Moscow: Lan', 2001. 720 p.
10. Volkov, E.A. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Saint-Petersburg: Lan', 2007. 256 p.
11. Solov'ev, I.A., Chervyakov, A.V., Repin, A.Yu. *Prikladnaya matematika. Primenenie programmnoy sredy Python S60* [Repin Applied Mathematics. Application of the Python S60 software environment]. Moscow, 2010. 280 p.