



УДК 621.182

С. А. ЛЕПУСТИН, аспирант кафедры теплогазоснабжения; **А. Г. КОЧЕВ**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой теплогазоснабжения; **М. М. СОКОЛОВ**, канд. техн. наук, доц. кафедры теплогазоснабжения

РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ В ПАРOKОНДЕНСАЦИОННЫХ ДВУХКОНТУРНЫХ КОТЛАХ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 433-45-35;
факс: (831) 430-03-82; эл. почта: kochev.1961@mail.ru

Ключевые слова: двухконтурные котлы, независимая схема теплоснабжения, теплообменники, водотрубное пространство, системы ГВС, системы отопления.

Приводятся экспериментальные данные и теоретические результаты обзора и исследования режимов работы двухконтурных котлов. Рассмотрены преимущества работы пароконденсационных котлов в вакуумном режиме.

Наиболее распространенной схемой теплоснабжения гражданских и промышленных объектов в настоящее время является независимая система теплоснабжения с двумя и более контурами. Первый контур – это котел, насосы и греющая часть теплообменника; второй и последующие – нагреваемая часть теплообменников, «сетевые» насосы, сети теплоснабжения, ГВС.

В данной схеме возможно использование двухконтурных котлов двух типов. В котлах первого типа принцип работы аналогичен классическому паровому котлу. Отличие заключается в образовании в паровом пространстве пара, который не отводится к потребителю, а конденсируется на поверхностях сетевых теплообменников отопления и/или горячего водоснабжения, которые установлены в паровом объеме (пароконденсационный режим). Принцип функционирования котлов второго типа основывается на принципе работы водогрейного котла.

В данной работе остановимся более подробно на котлах первого типа – пароконденсационных, которые были разработаны в середине прошлого века. Среди представленных отечественных и зарубежных производителей представлены следующие вакуумные водогрейные котлы: «Дорогобужкотломаш» серии KB-Г "Vacumatic" (0,63; 1,1; 2,0 МВт); *BOOSTER Co., LTD* (Ю. Корея), серии *BOV* (от 0,41 до 3,49 МВт); *Nippon Thermoener CO., LTD* (Япония), серий *K/HK/GFL/GTL*, (0,19 до 2,32 МВт); *KD Navien* (Ю. Корея).

В водотрубное пространство котла заливается подготовленная котловая вода, которая выполняет функцию промежуточного (внутрикотлового) теплоносителя. К встроенным теплообменникам котла подсоединяются сетевые контуры системы отопления и ГВС.

Для удаления воздуха из промежуточного (внутрикотлового) теплоносителя, оказывающего влияние на коррозию, а также, для снижения внутреннего давления теплоносителя и понижения точки кипения – данный тип котлов, как правило, оснащается вакуумными насосами. При пуско-наладочных работах методом прогрева, пропаривания и работой вакуумного насоса в водотрубном



пространстве создается вакуум. Исходя из наличия вакуумного насоса, входящего в базовую комплектацию рассматриваемых пароконденсационных котлов, их также принято называть «вакуумные», «вакуумные пароконденсационные» или «вакуумные водогрейные» котлы.

В вакууме парообразование происходит при гораздо меньшей температуре, что позволяет использовать тепловую энергию пара при рабочей температуре намного ниже 100°C . Для примера, температура кипения внутрикотловой воды у котлов серии *BOOSTER* серии BOV – 80°C при давлении 0,49 атм., у котлов «Дорогобужкотломаш» серии KB-Г "Vacumatic" – 90°C при давлении 0,72 атм. [1], [2]. Пароводяная смесь по подъемным экранным трубами поступает в сборную камеру прямоугольного сечения, откуда отсепарированный пар поступает в паровой объем к теплообменникам из нержавеющей стали, один из которых предназначен для нагрева воды внешнего контура отопления, второй – для нагрева воды контура ГВС. Тепло пара передается поверхностям теплообменников, образующийся при этом конденсат стекает в водный объем сборной камеры. В дальнейшем, смешиваясь с котловой водой, конденсат поступает по опускным трубам в нижний коллектор. При этом нижний коллектор, подъемные топочные трубы, верхний сборный коллектор, опускные экранные трубы образуют замкнутый контур естественной циркуляции.

Поскольку при таком конструктивном решении подготовленная вода в котел заливается лишь один раз (как правило, не чаще чем один раз в отопительный период), данное решение снимает проблему химической подготовки котловой воды, являющейся необходимым условием надежной и продолжительной работы котла.

Несменяемость теплоносителя и низкое давление внутри котла (порядка 0,49 – 0,72 атм.) значительно снижает кислородную коррозию и отложение накипи на жаровых поверхностях. В свою очередь, при низком качестве сетевой (обратной) воды в трубах встроенных теплообменниках второго контура (контуров отопления и ГВС) будут образовываться отложения накипи (рис. 1), но с точки зрения пережога труб первого контура котла, они безопасны.



Рис. 1. Примеры отложений в трубах теплообменников

При необходимости в котельной монтируют установку водоподготовки для подпитки тепловых сетей. Благодаря этим качествам двухконтурные пароводяные котлы по данному принципу работы использовались в условиях речного флота на судах с тесными котельными отделениями и упрощенными

водоподготовительными установками (например, судовые котлы КВВА-1,5/5, КВКА 6/5 и их аналоги) [3].

Рассмотрим варианты работы пароконденсационный котлов в двух теоретически возможных режимах работы при одном конструктивном исполнении [4] (рис. 2).

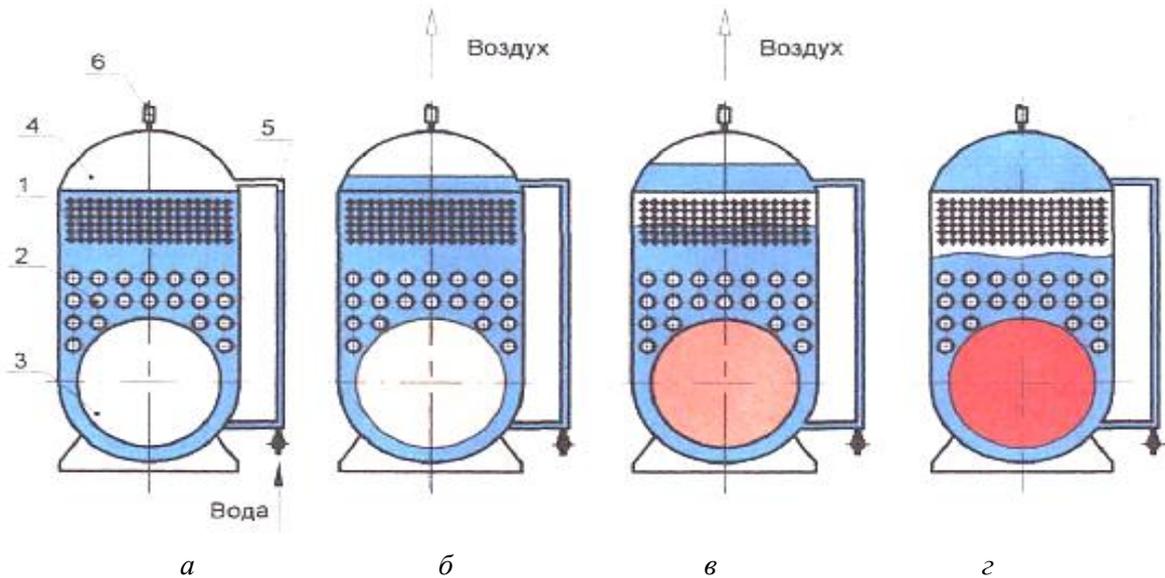


Рис. 2. Режимы работы двухконтурного котла: *а* – исходное состояние, *б* – водогрейный, *в* – водогрейно-пароконденсационный, *г* – пароконденсационный; 1 – бойлер; 2 – дымогарные трубы; 3 – топка; 4 – переливная ёмкость; 5 – трубопровод; 6 – автоматический воздухоотводчик

В обоих режимах первый контур замыкается внутри котла естественным движением массы воды или пара от нагретых поверхностей топки и дымогарных труб к более охлажденным поверхностям встроенных в котел сетевых теплообменников ГВС и отопления. Во втором контуре (сетевом) нагретая в бойлере вода подается потребителям с помощью сетевых насосов. В водогрейном режиме (рис. 2*б*) промежуточный (внутрикотловой) теплоноситель заполняет все межтрубное пространство котла. Нагреваемая внизу котловая вода, где располагаются поверхности нагрева от дымовых газов, поднимается вверх и омывает наружные поверхности трубок сетевых теплообменников отопления и ГВС.

С целью компенсации температурного расширения при нагреве внутрикотлового теплоносителя должен быть предусмотрен расширительный бак, соединенный с объемом котла. Теплоотдача от котловой воды к трубкам происходит за счет естественной конвекции. При нагреве воды более 90 – 95 °С в замкнутом объеме на теплопередающих поверхностях возникают паровые пузырьки. При этом происходит поверхностное кипение и нарушение пограничного слоя жидкости, являющегося основным тепловым сопротивлением, вследствие этого коэффициент теплоотдачи к стенке трубки резко возрастает. В результате естественной конвекции охлажденная котловая вода опускается в зону нагрева к наружной поверхности топки и дымогарным трубам. Коэффициент



теплоотдачи внутрикотлового теплоносителя к трубкам теплообменников отопления и ГВС при этом составляет $a_m = 800\text{--}1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$) [5].

В пароконденсационном режиме работы котла (рис. 2з) трубки теплообменников сетевой воды отопления и ГВС расположены в паровом пространстве. Нагрев воды осуществляется конденсирующимся паром. С целью снижения внутрикотлового давления и удаления воздуха, котлы оборудуются вакуумным насосом. На поверхности трубок, расположенных в паровом пространстве котла, в начальный период конденсации образуются отдельные капли конденсата. Образование, рост и скатывание капель происходит быстро и непрерывно, что способствует освобождению поверхности теплообменника для непосредственного соприкосновения с конденсирующимся паром. Однако капельная конденсация является процессом неустойчивым и со временем переходит в пленочную, процесс которой является преобладающим (рис. 3). Следует отметить, что капельная конденсация значительно эффективнее пленочной. Для создания условий длительного процесса капельной конденсации используются такие методы, как использование гидрофобной поверхности в виде твердого покрытия, в том числе использование тефлоновых покрытий и других ему подобных материалов на трубках теплообменника [6].

Наиболее рациональными методами интенсификации теплообмена со стороны конденсирующегося пара являются: создание капельной конденсации; применение низкоорбренных труб; создание вибрации поверхности теплообмена; применение наклона трубного пучка; разработка эффективных схем воздухоотсоса.

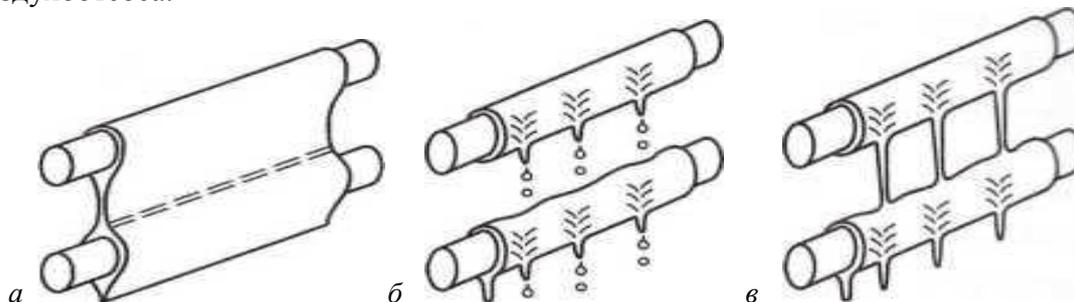


Рис. 3. Слева-направо: упрощенная (а) и действительная (б, в) картины стекания пленки конденсата в пучке горизонтальных труб



Рис. 4. Шахматное и коридорное расположение трубок в теплообменнике

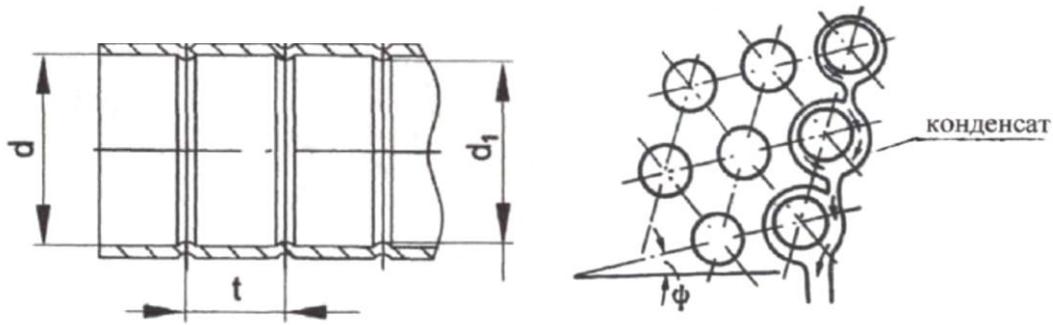


Рис. 5. Слева: трубка пароконденсационного теплообменника; справа: расположение трубок в теплообменнике котла по системе Жинабо

В теплообменниках рассматриваемых двухконтурных котлов интенсификаторы теплообмена могут быть выполнены способом холодной накатки трубок с получением чередующихся плавно очерченных выступов на их внутренней поверхности и кольцевых впадин на внешней поверхности. Наличие кольцевых впадин способствует отрыву капель конденсата, предотвращает образование сплошной пленки на трубках.

Исходя из практических опытов рекомендуемый относительный шаг накатки $\bar{t} = t/d = 0,25-1,0$ и относительный диаметр $\bar{d} = d_1/d = 0,9-0,95$, приведенные к диаметру гладкой трубы [6].

Классическим является расположение теплообменников в виде горизонтально расположенных рядов труб. Наиболее известные схемы расположения трубок теплообменника – шахматное, коридорное (рис. 4), система Жинабо (рис. 5), радиальное.

Коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара к поверхности трубок теплообменников отопления и/или ГВС $a_k = 5000-17000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ [7]. При равных условиях (диаметры трубок, скорости и температуры потоков) шахматное расположение дает более высокие коэффициенты теплоотдачи по сравнению с коридорным, хотя имеет более высокое гидравлическое сопротивление прохождению пара [7]. Расположение трубок по системе Жинабо (рис. 5) обеспечивают пленочное ламинарное отекание конденсата с трубок. Характер течения конденсата в реальных условиях несколько иной и основное влияние на величину коэффициента теплоотдачи оказывает скорость паровоздушной смеси и содержание в ней воздуха. Поэтому, как показывает практика применения, расположение трубок по системе Жинабо не имеет преимуществ перед другими системами [8]. Все системы расположения (разбивки) трубок в пучке эффективны при числе рядов по высоте не более $n < 12$.

Согласно формуле Нуссельта, отношение среднего коэффициента теплоотдачи для всей рассматриваемой плоской поверхности к среднему коэффициенту теплоотдачи на первом по ходу (верхнем) участке равно $n^{-1/4}$. Тогда, при сохранении ламинарного режима течения с гладкой пленкой в вертикальном ряду труб, средний коэффициент теплоотдачи для всего пучка из n труб тоже определяется, как:

$$a_{kn} = a_{k1} \cdot n^{-1/4}, \quad (1)$$

где a_{k1} – коэффициент теплоотдачи для верхнего ряда труб, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.



Формула (1) применима для ламинарного течения жидкости с одной трубы на следующую непрерывным однофазным потоком вдоль всей длины трубы. В реальных условиях конденсат стекает с трубы на трубу каплями, разбрызгивается, что ведет к турбулизации пленки и повышению величины коэффициента теплоотдачи. Основываясь на экспериментальных данных, формула Керна для определения среднего значения a_{kn} имеет вид [9]:

$$a_{kn} = a_{kl} \cdot n^{-1/6}, \quad (2)$$

где a_{kl} – коэффициент теплоотдачи для верхнего ряда труб, Вт/(м² · °С).

В этом случае графическое отображение значений a_k между минимальным ($a_k = 5000$ Вт/(м² · °С)) и максимальными значениями ($a_k = 17000$ Вт/(м² · °С)) для n числа рядов труб теплообменника при работе в пароконденсационном режиме приобретает следующий вид диаграммы (рис. 6):

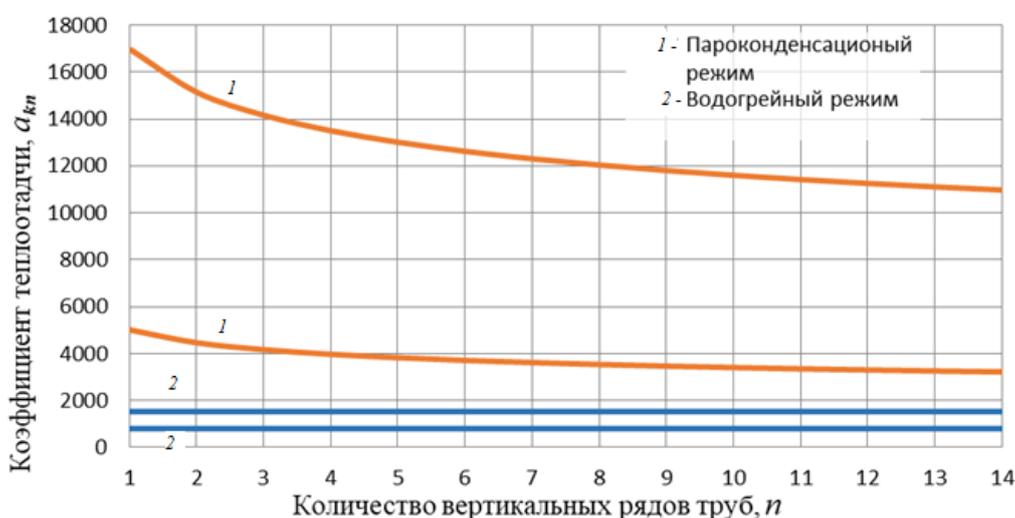


Рис. 6. Среднее значение коэффициента теплоотдачи a_{kn} в границах минимума-максимума при пароконденсационном и коэффициенте теплоотдачи a_t при водогрейном режиме для n рядов труб

Однако следует учесть, что представленные уравнения (1) и (2) применимы при давлениях, близких к атмосферным. При значительном уменьшении давления в разреженном объеме вакуумного котла происходит снижение коэффициента теплоотдачи, расчет которого может быть представлен следующим корреляционным уравнением:

$$a_k = 5580 A_p F_{PF} (q_0/20000)^{0,9-0,3p^{*0,15}}, \quad (3)$$

где q – плотность теплового потока, p^* – давление, ниже атмосферного, A_p – вводимый нами корректирующий эмпирический коэффициент, учитывающий особенности работы котлов в пароконденсационном и водогрейном режимах, F_{PF} – параметр, учитывающий влияние давления, определяется по формуле:

$$F_{PF} = 1,73 p^{*0,27} + (6,1 + 0,68/(1 - p^{*2})) p^{*2}. \quad (4)$$

Выводы:

1. Общее преимущество вакуумных пароконденсационных котлов по отношению к традиционным (классическим) водогрейным котельным – уменьшение стоимости и габаритов котельной за счет исключения необходимости



использования дополнительного оборудования (теплообменников отопления и/или ГВС, узла подпитки котлового контура, др.)

2. При сравнении водогрейного и пароконденсационного режимов работы для единого конструктивного исполнения котла, для пароконденсационного режима характерны более высокие значения коэффициентов теплоотдачи.

3. В пароконденсационном режиме работы увеличение количества вертикальных рядов труб встроенных теплообменников котла оказывает значимое влияние на снижение усредненного коэффициента теплоотдачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каталог котельного оборудования производства компании BOOSTER. – URL: <http://www.booster-rus.ru/>. – Текст : электронный.

2. Каталог котельного оборудования производства «Дорогобужкотломаш. – URL: // <https://dkm.ru/>. – Текст : электронный.

3. Ениватов, В. В. Судовые котельные и паропроизводящие установки : конспект лекций / В. В. Ениватов, Е. О. Макаренко ; Керченский Государственный Морской Технологический Университет. – Керчь : КГМТУ, 2019. – 82 с. – Текст : непосредственный.

4. Автономные системы теплоснабжения с двухконтурными котлами : монография / К. А. Жидилов, Н. М. Сергиенко, А. С. Хряпченков, В. В. Язовцев ; под общей редакцией А. С. Хряпченкова ; Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. – 82 с. – ISBN 978-5-93272-950-2. – Текст : непосредственный.

5. Расчет теплообменных аппаратов. Кожухотрубчатые теплообменники : учебное пособие / А. А. Липин, Ю. Е. Романенко, А. В. Шибашов, А. Г. Липин ; Ивановский государственный химико-технологический университет. – Иваново : Ивановский ГХТУ, 2017. – 76 с. – Текст : непосредственный.

6. Эффективные поверхности теплообмена / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, И. З. Копп, А. С. Мякочин. – Москва : Энергоатомиздат, 1998. – 408 с. – Текст : непосредственный.

7. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – Изд. 8-е, перераб. – Москва : Химия, 1971. – 784 с. – Текст : непосредственный.

8. Ермилов, В. Г. Теплообменные аппараты и конденсационные установки / В. Г. Ермилов. – Ленинград : Судостроение, 1969. – 264 с. – Текст : непосредственный.

9. Суслов, В. А. Тепломассообмен при фазовых превращениях : учебное пособие / В. А. Суслов ; Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. – Санкт-Петербург : ВШТЭ СПбГУПТД, 2019. – 114 с. – ISBN 978-5-91646-171-8. – Текст : непосредственный.

10. Жидилов, К. А. Исследование и разработка систем автономного теплоснабжения с двухконтурными котлами : специальность : 05.23.03 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Жидилов Константин Ариевич ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2009. – 185 с. – Текст : непосредственный.



LEPUSTIN Sergey Aleksandrovich, postgraduate student of chair of heat and gas supply systems; KOCHEV Aleksey Gennadievich, doctor of technical sciences, professor, holder of the chair of heat and gas supply systems; SOKOLOV Mikhail Mikhailovich, candidate of technical sciences, associate professor of chair of heat and gas supply systems

WORKING PROCESSES IN STEAM-CONDENSING DOUBLE-CIRCUIT BOILERS

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Iljinskaya St., 603952, Nizhny Novgorod, Russia. Tel.: +7 (831) 433-45-35;
e-mail: unirs@nngasu.ru

Key words: double-circuit boilers, independent heat supply circuit, heat exchangers, water-tube space, hot water supply systems, heating systems.

The article presents experimental data and theoretical results from a review and analysis of the operating modes of double-circuit boilers. The advantages of operating steam-condensing boilers in vacuum mode are considered.

REFERENCES

1. Katalog kotelnogo oborudovaniya proizvodstva kompanii BOOSTER [Catalog of boiler equipment produced by BOOSTER]. URL: <http://www.booster-rus.ru>.
2. Katalog kotelnogo oborudovaniya proizvodstva Dorogobuzhкотломаш [Catalog of boiler equipment produced by Dorogobuzhкотломаш]. URL: <https://dkm.ru/>.
3. Enivatov V. V., Makarenko E. O. Sudovye kotelnye i paroproizvodyaschie ustanovki [Marine boiler houses and steam production plants]. konspekt lektsiy. Kerchensk. gos. morskoy tekhnologich. un-t, Kerch, 2019. – 82 p.
4. Zhidilov K. A., Sergienko N. M., Khryapchenkov A. S., Yazovtsev V. V. Avtonomnyye sistemy teplosnabzheniya s dvukhkoturnymi kotlami [Autonomous heat supply systems with double-circuit boilers] : monografiya // Nizhegorod. gos. tekhnichesk. un-t. – Nizhny Novgorod, 2011. – 82 p.
5. Lipin A. A., Romanenko Yu. E., Shibashov A. V., Lipin A. G. Raschet teploobmennyykh apparatov. Kozhukhotrubchatyye teploobmenniki: [Calculation of heat exchangers. Shell and tube heat exchangers] / Ucheb. Posobiye. Ivanovskiy gos. khimiko-tekhnologich. un-t, Ivanovo, 2017. – 76 p.
6. Kalinin E. K., Dreitser G. A., Kopp I. Z., Myakochin A. S. Effektivnyye poverkhnosti teploobmena [Effective heat transfer surfaces]. Moscow: Energoatomizdat, 1998. – 408 p.
7. Kasatkin A. G. Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. – Izd. 2-e per. i dop. Moscow: Khimiya, 1971, 784 p.
8. Ermilov V. G. Teploobmennyye apparaty i kondensatsionnyye ustanovki [Heat exchangers and condensation units]. Leningrad: Sudostroenie, 1969. – 264 p.
9. Suslov V. A. Teplomassoobmen pri fazovykh prevrashcheniyakh: ucheb. posobiye [Heat and mass transfer during phase transformations] / SPbSUITD. St. Petersburg, 2019. – 114 p. – ISBN 978-5-91646-171-8.
10. Zhidilov K. A. Issledovaniye i razrabotka sistem avtonom-nogo teplosnabzheniya s dvukh koturnymi kotlami [Research and development of autonomous heat supply systems with two circuit boilers:] : spetsialnost 05.23.03 : diss. ... kand. tekhn. nauk ; Nizhegorod. gos. tekhnichesk. un-t. – Nizhny Novgorod, 2009, 185 p.

© С. А. Лепустин, А. Г. Кочев, М. М. Соколов, 2024

Получено: 06.05.2024 г.