

УДК 621.1.016

Н. П. Саевич, Д. Г. Калишук, В. И. Козловский
Белорусский государственный технологический университет

ТЕПЛООБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА В СТРУЙНОМ ЦИРКУЛЯЦИОННОМ КОНТАКТНОМ ПОДОГРЕВАТЕЛЕ

В статье проведен обзор и анализ технологий нагрева жидких сред и аппаратов, используемых для этой цели. В обзоре наибольшее внимание уделено процессу нагрева жидкости острым паром и струйным теплообменникам смешения. Отмечено увеличение интереса в использовании в энергетике и других отраслях хозяйственной деятельности человека струйных теплообменников-подогревателей жидких сред. Предложена конструкция циркуляционного контактного теплообменника-подогревателя выносного типа. Описана лабораторная установка для исследования циркуляционного струйного теплообменника и изложена методика его экспериментальных исследований. Дано краткое описание исследованных модификаций аппарата. Приведены результаты выполненного эксперимента и обработки опытных данных, а также их анализ. При анализе использована информация, полученная путем визуальных наблюдений и видеосъемки. Приведены данные о теплотехнических характеристиках и режимах работы испытанных моделей теплообменников. Доказана пригодность аппарата, разработанного на основе результатов лабораторных исследований, для нагрева жидких сред, содержащих твердые включения.

Ключевые слова: теплообменник, смешение, острый пар, конденсация, циркуляция, струйный аппарат.

Для цитирования: Саевич Н. П., Калишук Д. Г., Козловский В. И. Теплообмен и гидродинамика в струйном циркуляционном контактном подогревателе // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 1 (241). С. 108–113.

N. P. Saevitch, D. G. Kalishuk, V. I. Kozlovskiy
Belarusian State Technological University

HEAT EXCHANGE AND HYDRODYNAMICS IN THE JET CIRCULATION CONTACT HEATER

The article reviews and analyzes the technologies of heating liquid media and devices used for this purpose. In the review the greatest attention is paid to the process of liquid heating with sharp steam and jet mixing heat exchangers. The increase of interest in the use of jet heat exchangers-heaters of liquid media in power engineering and other branches of economic activity was noted. The design of the circulation contact heat exchanger-heater of remote type is offered. The laboratory unit for research of the circulation jet heat exchanger is described and the method of its experimental research is described. A brief description of the studied modifications of the unit is given. The results of the performed experiment and processing of experimental data as well as their analysis are given. The information obtained through visual observations and videotaping is also used in the analysis. Data on heat engineering characteristics and operation modes of the tested models of heat exchangers are given. The suitability of the apparatus developed on the basis of laboratory research results for heating liquid media containing solid inclusions has been proved.

Key words: heat exchanger, mixing, direct steam, condensation, circulation, jet device.

For citation: Saevitch N. P., Kalishuk D. G., Kozlovskiy V. I. Heat exchange and hydrodynamics in the jet circulation contact heater. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 1 (241), pp. 108–113 (In Russian).

Введение. В промышленности в основном используют два принципиально отличающихся по организации взаимодействия теплоносителей типа теплообменных аппаратов: поверхностные (рекуперативные) и контактные (смешения) [1–3]. Теплообмен в контактных аппаратах протекает более интенсивно по сравнению с поверхностными. Также контактные теплообменники обладают меньшей материалоемкостью и стоимостью, они проще по конструкции и в эксплуатации.

Существенным недостатком контактных теплообменников является то, что они применимы лишь в случаях, если допускается смешение взаимодействующих теплоносителей, например нагреваемой технологической среды с греющим агентом.

Наиболее распространенными контактными теплообменниками наряду с конденсаторами смешения являются аппараты для нагревания жидких сред острым паром. Они широко при-

меняются в химической, горноперерабатывающей и пищевой промышленности, в сельском хозяйстве для нагрева чистых жидкостей, а также растворов, суспензий и т. д.

Нагрев жидких сред острым паром имеет следующие преимущества по сравнению с их нагревом глупым паром:

– при использовании острого пара отсутствует термическое сопротивление твердой стенки, разделяющей теплоносители;

– движение и конденсация паровых пузырей в жидкости вызывает ее дополнительное перемешивание и активную турбулизацию, что интенсифицирует теплопередачу;

– процесс эксплуатации оборудования более стабилен во времени, так как требуется меньше остановок теплообменной аппаратуры на очистку.

В большинстве случаев при нагреве острым паром используются контактные подогреватели жидких сред барботажного и струйного типов.

В результате анализа патентов, публикаций в журналах и на Интернет-ресурсах мы пришли к выводу, что в настоящее время проявляется значительный интерес к применению струйных аппаратов-теплообменников на объектах энергетики, а также в других отраслях хозяйственной деятельности человека. Эти аппараты привлекательны прежде всего низкими капитальными и эксплуатационными затратами по сравнению с кожухотрубчатыми, пластинчатыми и другими поверхностными подогревателями. Струйные аппараты широко рекламируются и активно продвигаются на рынке энергетического оборудования, о чем, например, свидетельствуют статьи [4, 5], сайт компании Spiraxsarco [6], многочисленные патенты. В Российской Федерации массово производятся струйные теплообменники смешения марок ПСА, ТСА, «Фисоник», «Транссоник», СФА, «Коссет», УМПЭУ.

Струйные теплообменники-подогреватели по сравнению с барботажными компактны и легко встраиваются в технологическое оборудование (реакторы, растворители и т. д.) и трубопроводы. Однако установка и эксплуатация их внутри емкостных или колонных аппаратов во многих случаях нежелательна из-за динамических воздействий высокоскоростной струи пара на элементы конструкции, а также из-за негативных эффектов, сопряженных с явлением кавитации, возникающим при конденсацией острого пара в нагреваемой жидкой среде. При указанных обстоятельствах применим вариант использования вынесенного контактного теплообменника с вводом струи пара в жидкость. Он не требует установки насоса для организации циркуляции жидкости и, следовательно, дополнительного расхода энергии на его привод. В учебной и в

фундаментальной научной литературе [3, 7–11] информация о расчетах, конструировании и режимах работы подобных струйных контактных теплообменников смешения отсутствует.

Основная часть. Авторами был разработан образец циркуляционного контактного теплообменника-подогревателя, а также экспериментальная установка для его исследований. Схема установки представлена на рис. 1. Установка включает емкость 4, соединенную циркуляционными трубами 2 и 3 с корпусом теплообменного аппарата 1. Внутри корпуса 1 устанавливалось эжекционное устройство 5. Для контроля и измерения текущих значений температуры в различных зонах теплообменника были установлены термометры $T1$ – $T3$ марки Chectemp 1 Hanna (погрешность измерения температуры $\pm 0,2^\circ\text{C}$), для определения давления пара – манометры $M3$ и $M4$. Корпус теплообменника, циркуляционные трубы и емкость были изготовлены из прозрачного материала (полиметилакрилового органического стекла), что позволяло вести визуальные наблюдения процессов в аппарате в ходе эксперимента.

При проведении опытов емкость 4, корпус теплообменного аппарата 1, циркуляционные трубы 2 и 3 заполнялись водой. Через эжекционное устройство 5 в жидкость подавался острый пар. Эжекционный эффект в зоне взаимодействия фаз обеспечивал при работе аппарата активную направленную циркуляцию жидкости по замкнутому контуру «емкость 4 – холодная труба 3 – корпус теплообменного аппарата 1 – горячая труба 2 – емкость 4».

В ходе эксперимента определялась динамика изменения температуры среды в различных точках теплообменника и циркуляционных труб установки. Кроме того, проводилась видеосъемка зоны взаимодействия пара с жидкостью и картины течения трассера в циркуляционной трубе 3 при измерении скорости циркуляции. Визуальными наблюдениями оценивался характер взаимодействия пара и жидкости в аппарате.

При выполнении опытов избыточное давление пара на входе в сопло эжекционного устройства изменялось от 15 до 40 кПа. При этом расчетное значение скорости истечения пара из сопла составляло от 20 до 125 м/с.

В ходе обработки опытных данных определялись количество тепла на нагрев жидкости, скорость циркуляции, скорость пара на выходе из сопла (скорость истечения), удельный объемный теплосъем и объемный коэффициент теплопередачи и динамика изменения температуры нагреваемой среды.

Визуальные наблюдения за характером взаимодействия острого пара и нагреваемой жидкости в теплообменном аппарате и горячей

трубе циркуляционного контура выявили следующие тенденции. При скорости истечения пара, не превышавшей 50 м/с, наблюдалась нестабильная и малоинтенсивная работа теплообменника. В таких случаях пар из сопла зачастую выходил в виде крупных пузырей и их агломератов. Эти пузыри и агломераты в основном не успевали сконденсироваться в аппарате для подвода острого пара и в горячей трубе циркуляционного контура. При высоких скоростях истечения пара из сопла образовывался устойчивый, отчетливо видимый парожидкостный факел, включавший в свой состав мелкие, диаметром не более 1,5 мм, пузырьки пара. За пределами данного факела объемная концентрация пузырьков несконденсировавшегося пара была незначительной, и нагреваемая жидкость не теряла прозрачности. Проскок несконденсировавшегося пара на свободную поверхность жидкости в емкости 4 при этом не наблюдался.

На рис. 2 представлена динамика изменения температуры воды на выходе из циркуляционного теплообменника t_1 для различных вариантов исполнения узла ввода острого пара (с эжектором и без него).

Согласно представленным графикам, наблюдается практически линейная зависимость между температурой нагретой воды и временем нагревания. Некоторые отклонения от линейной зависимости можно объяснить нестабильностью подачи водяного пара парогенератором из-за периодического автоматического отключения трубчатых электронагревателей.

С ростом избыточного давления пара время нагрева сокращается, что объясняется увеличением количества подаваемого греющего агента.

Установка дополнительно к соплу эжекционной трубы существенно не влияет на интенсивность теплообмена в подогревателе. Это подтверждается практически совпадающими кривыми, соответствующими избыточному давлению пара 20 кПа с эжектором и без него. Хотя установка эжекционной трубы изменяет гидродинамическую картину движения парожидкостных потоков внутри теплообменника, среднее значение времени пребывания пузырьков острого пара в нагреваемой жидкости до попадания в основной аппарат в обоих случаях оказывается достаточным для их полной конденсации.

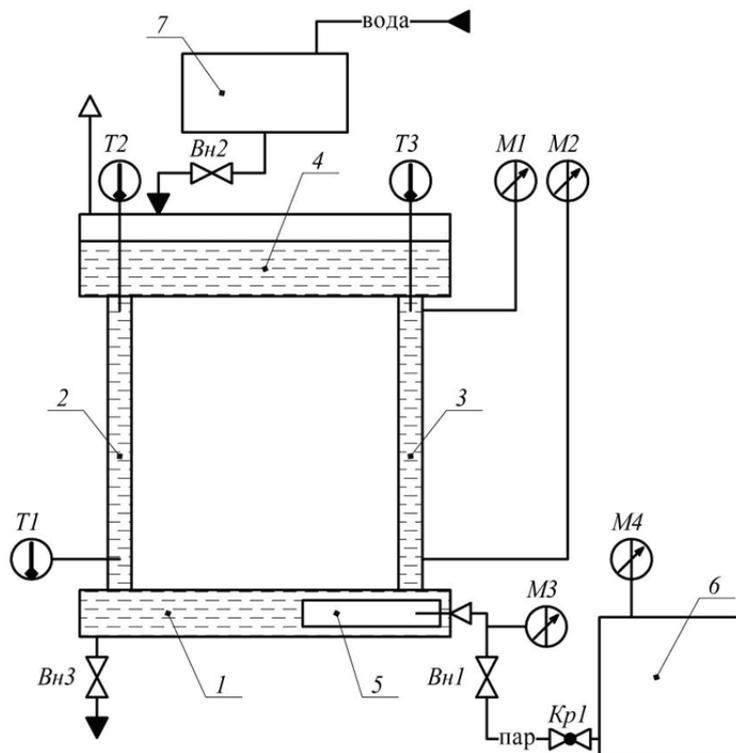


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

для исследований циркуляционного теплообменника:

- 1 – корпус теплообменного аппарата; 2 – горячая труба циркуляционного контура;
- 3 – холодная труба циркуляционного контура; 4 – емкость;
- 5 – устройство эжекционное; 6 – парогенератор; 7 – термостат;
- M1 и M2 – пьезометры; M3 – манометр образцовый;
- M4 – манометр; T1–T3 – термометры; Вн1–Вн3 – вентили; Кр1 – кран

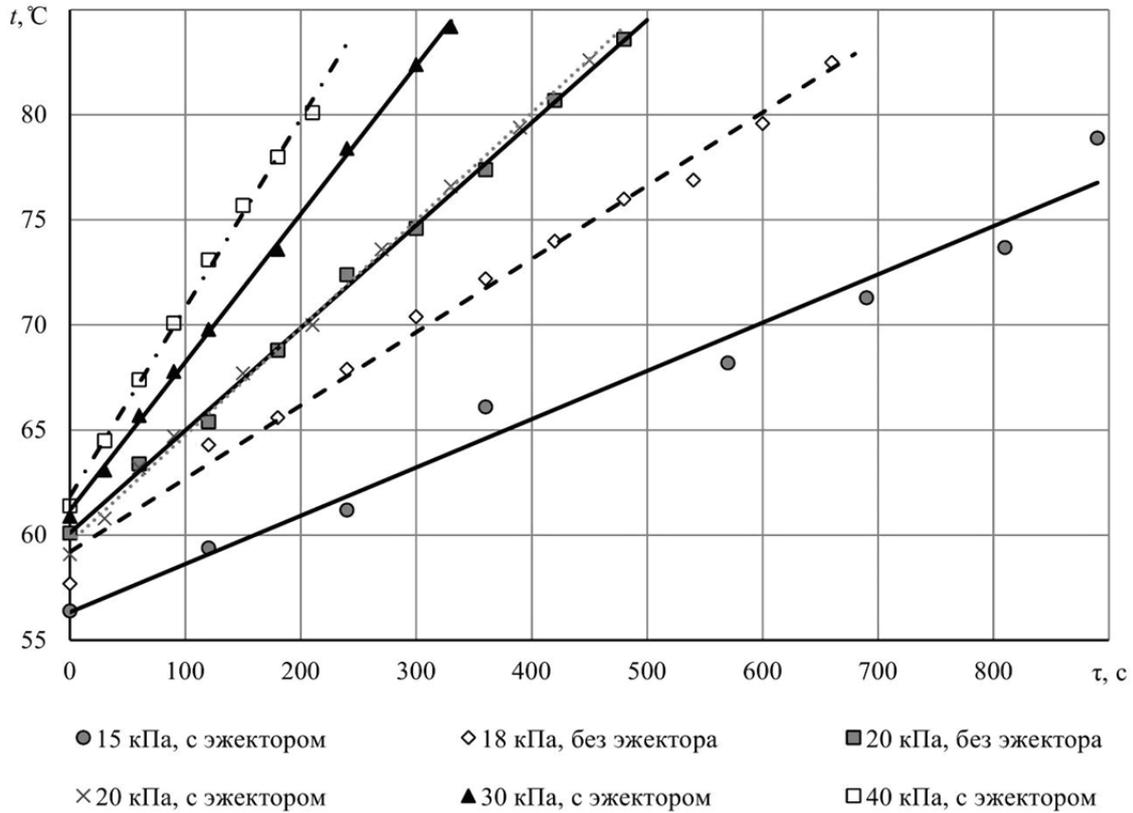


Рис. 2. Динамика изменения температуры воды на выходе из циркуляционного теплообменника

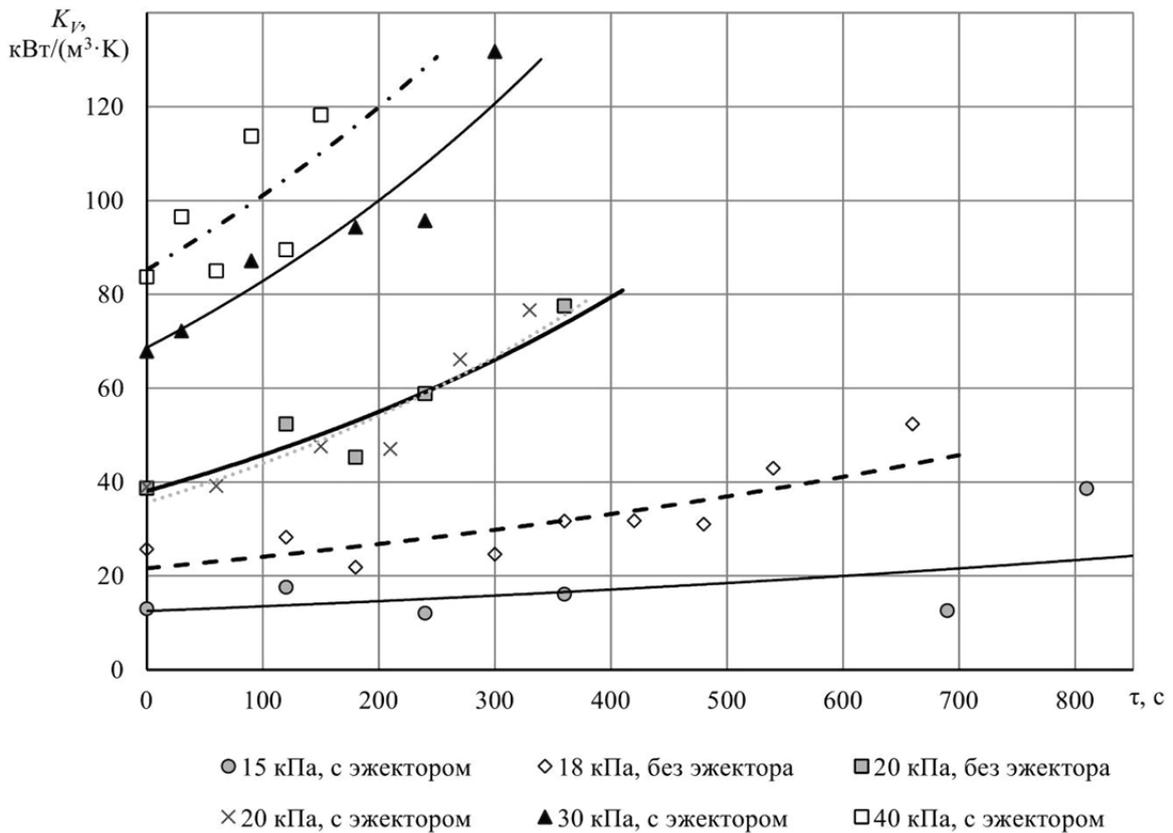


Рис. 3. Динамика объемного коэффициента теплопередачи в циркуляционном теплообменнике

Графики, отражающие динамику роста объемного коэффициента теплопередачи K_V при различных давлениях пара и исполнениях узла ввода острого пара, показаны на рис. 3.

Коэффициент теплопередачи (в расчете на объем аппарата для подвода острого пара) при скоростях истечения 80–125 м/с составляет от 70 до 130 кВт/(м³ · К). Значение коэффициента теплопередачи при этом возрастает с ростом скорости истечения острого пара. Объемная плотность теплового потока в аппарате для подвода острого пара достигала 3,75 МВт/м³.

Скорость циркуляции нагреваемой жидкости (ее движения в циркуляционных трубах), определенная методом трассирования, при избыточном давлении греющего пара на входе в сопло 30–40 кПа составляла от 0,3 до 0,6 м/с. Это позволяет сделать вывод о применимости исследованного контактного выносного теплообменника для нагревания жидкости с включениями в виде твердых частиц размером до 30 мкм при их плотности, не превышающей 2500 кг/м³. Отметим, что рассчитанные по уравнениям материального и теплового балансов и полученные методом трассирования значения скорости циркуляции отличались не более чем на 20%.

Заключение. Исследованный теплообменник-подогреватель имеет простую конструкцию, легко встраивается в существующие ем-

костные или колонные аппараты и не требует установки насоса.

Выносная конструкция теплообменника позволяет исключить влияние динамических воздействий высокоскоростной струи острого пара на элементы конструкции основного аппарата, а также минимизировать негативное влияние кавитационных эффектов.

В результате проведенных экспериментальных исследований лабораторной модели выносного циркуляционного теплообменника смешения выяснено следующее:

- эффективность работы теплообменника зависит от скорости истечения острого пара в нагреваемую жидкость;
- интенсивность теплообмена скачкообразно возрастает при скоростях истечения пара из сопла 55–80 м/с;
- при скорости истечения пара из сопла более 80 м/с достижимы объемные коэффициенты теплопередачи свыше 70 кВт/(м³ · К), при этом удельный теплосъем может превышать значенный 2 МВт/м³;
- скорость циркуляции нагреваемой жидкости при избыточном давлении греющего пара на входе в сопло 30–40 кПа составляла от 0,3 до 0,6 м/с, что позволяет сделать вывод о применимости исследованного теплообменника для нагревания жидкости с механическими включениями.

Список литературы

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Альянс, 2004. 751 с.
2. Теплотехника: учеб. для вузов / В. Н. Луканин [и др.]; под ред. В. Н. Луканина. М.: Высш. шк., 2000. 671 с.
3. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоатомиздат, 1981. 416 с.
4. Белевич А. И., Крупцев А. В., Малофеев В. А. О применении паровых инжекторов в тепло-снабжении // Энергетик. 2001. № 11. С. 20–22.
5. Недугов А. Ф., Куркулов М. А. Водоструйный паровой эжектор с камерой предварительного смешения // Промышленная энергетика. 2007. № 1. С. 20–23.
6. Паровые инжекторы [Электронный ресурс] // Сайт компании Spirax Sarco. URL: <http://www.spiraxsarco.com/ru/products-services/products/boiler-controls-and-systems/steam-injectors.asp> (дата обращения: 09.02.2015).
7. Смешивающие подогреватели паровых турбин / В. Ф. Ермолов [и др.]. М.: Энергоиздат, 1982. 208 с.
8. Контактные теплообменники / Е. И. Таубман [и др.]. М.: Химия, 1987. 256 с.
9. Соколов Е. Я., Зингер Н. М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
10. Цегельский В. Г. Двухфазные струйные аппараты. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 408 с.
11. Соснин Ю. П. Контактные водонагреватели. М.: Стройиздат, 1974. 359 с.

References

1. Kasatkin A. G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and devices of chemical technology]. Moscow, Al'yans Publ., 2004. 751 p.
2. Lukanin V. N., Shatrov M. G., Kamfer G. M. *Teplotekhnika: uchebnyk dlya vuzov* [Thermotechnics: textbook for universities]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 671 p.

3. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1981. 416 p.
4. Belevich A. I., Krupstev A. V., Malofeev V. A. On the application of steam injectors in heat supply. *Energetik* [Power engineer], 2001, no. 11, pp. 20–22 (In Russian).
5. Nedugov A. F., Kurkulov M. A. Water-jet steam ejector with pre-mixing chamber. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy], 2007, no. 1, pp. 20–23 (In Russian).
6. *Parovye inzhektory: sayt kompanii Spirax Sarco* [The steam injectors: Spirax Sarco company website]. Available at: <http://www.spiraxsarco.com/ru/products-services/products/boiler-controls-and-systems/steam-injectors.asp> (accessed 09.02.2015).
7. Ermolov V. F. *Smeshivayushchie podogrevateli parovykh turbin* [Mixing heaters of steam turbines]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 208 p.
8. Taubman E. I. *Kontaktnye teploobmenniki* [Contact heat exchangers]. Moscow, Khimiya Publ., 1987. 256 p.
9. Sokolov E. Ya., Zinger N. M. *Struynye apparaty* [Jet apparatuses]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 352 p.
10. Tsegel'skiy V. G. *Dvukhfaznye struynye apparaty* [Two-phase jet apparatuses]. Moscow, MGТУ im. N. E. Bauman Publ., 2003. 408 p.
11. Sosnin Yu. P. *Kontaktnye vodonagrevateli* [Contact water heaters]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974. 359 p.

Информация об авторах

Саевич Николай Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: saevichm@belstu.by

Калишук Дмитрий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kalishdz@belstu.by

Козловский Виталий Игоревич – ассистент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: mr.vit.koz@mail.ru

Information about the authors

Saevitch Nikolay Petrovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Processes and Apparatus of Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: saevichm@belstu.by

Kalishuk Dmitry Grigorievich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Processes and Apparatus of Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kalishdz@belstu.by

Kozlovskiy Vitaliy Igoryevich – Assistant Lecturer, the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Productions. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mr.vit.koz@mail.ru

Поступила 12.11.2020