

ФИЗИКА

УДК 66.021.3/4

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СТРУЙНО-ПЛЕНОЧНОГО КОНТАКТНОГО УСТРОЙСТВА С ЦЕЛЬЮ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОМАССОБМЕНА

И.И. Шарипов¹, Л.В. Круглов¹, В.И. Круглов¹, О.С. Дмитриева²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

ranli@rambler.ru, tot_kgeu@mail.ru, ja_deva@mail.ru.

Резюме: В статье авторами представлена конструкция контактного устройства с искусственной неровностью на вертикальной перегородке, способствующей увеличению удельной площади контакта жидкой и газовой фазы с целью интенсификации процесса теплообмена в колонных аппаратах, схема экспериментальной установки, методика проведения эксперимента, полученные результаты проведенных экспериментов и выводы по работе. Эксперименты продемонстрировали влияние геометрических параметров рабочего участка (ширина рабочего участка, высота рабочего участка, радиус загиба рабочего участка) искусственной неровности перегородки контактного устройства на площадь растекания пленки и на отклонение жидкости от оси рабочего участка. Показано наиболее эффективное соотношение диаметра стока жидкости к ширине рабочего участка и влияние высоты рабочего участка на эффективность предложенной конструкции струйно-плёночного контактного устройства с искусственной неровностью на вертикальной перегородке.

Ключевые слова: колонные устройства, массообменные процессы, струйно-плёночное течение, искусственные неровности, контактные устройства.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-136-143

DEVELOPMENT OF THE STRUCTURE OF THE JET FILM CONTACT DEVICE CONSTRUCTION FOR INTENSIFICATION OF HEAT MASS EXCHANGE

I.I. Sharipov¹, L.V. Kruglov¹, V.I. Kruglov¹, O.S. Dmitrieva²

¹Kazan State Power engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

ranli@rambler.ru, , ja_deva@mail.ru, tot_kgeu@mail.ru.

Abstract: In the article the authors presented the construction of a contact device with an artificial unevenness on a vertical partition, which contributes to an increase in the specific contact area of the liquid and gas phases, in order to intensify the heat-storage process in the column apparatus, the experimental setup, the experimental procedure, the results of the experiments and the conclusions on the work. The experiments demonstrated the effect of the geometric parameters of the working section (width of the working area, height of the working area, bending radius of the

working section) of the artificial unevenness of the partition of the contact device on the spreading area of the film and on the deviation of the liquid from the axis of the edge of the working section. The most effective ratio of the diameter of the drain of the liquid to the width of the working section is shown and the influence of the height of the working area on the efficiency of the proposed design of a jet-film contact device with an artificial unevenness on a vertical partition.

Key words: *column devices, mass exchange processes, jet-film flow, artificial irregularities, contact devices.*

Введение

Процессы тепло- и массообмена, применяемые в различных циклах производства в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, а также в энергетике, на сегодняшний день являются энергетически затратными и экономически не рентабельны. В связи с программой энерго- ресурсосбережения правительства РФ [1] проблема интенсификации тепломассообменных процессов в колонных устройствах на сегодняшний день имеет большое значение. Основное внимание при разработке различных видов колонных массообменных аппаратов уделяется созданию условий эффективного взаимодействия жидкой и газовой фаз.

Одно из направлений интенсификации процесса связано с разработкой новых конструкций контактных устройств [2–6], которые должны обладать развитой поверхностью контакта фаз, высокой сепарационной способностью и относительно невысоким гидравлическим сопротивлением.

В современной литературе представлено множество исследований по взаимодействию газа и жидкости [7–20], однако представленные конструкции устройств обладают относительно малой площадью растекания жидкой фазы вдоль его боковой поверхности, вследствие чего необходим новый подход к созданию его оптимальных конструкций. Большинство проблем современных контактных устройств связано со сложностью создания равномерно стекающих пленок жидкости.

Одним из конструкционных решений является разработка струйно-пленочных контактных устройств с развитой поверхностью, способствующих повышению удельной площади контакта жидкой и газовой фаз в колонных аппаратах. Они работают следующим образом: жидкость стекает сверху вниз, попадая в сливные стаканы. В них она вовлекает внутрь сливных стаканов поток газа, который находится там в виде пузырей. С поверхности жидкости газ срывает капли, которые за счет действия центробежной силы возвращаются обратно. Благодаря этому возникает интенсивное взаимодействие газожидкостных потоков с очень малым временем обновления поверхности. Кроме того, возникающая за счет особенностей конструкции струйно-пленочных контактных устройств центробежная сила обеспечивает надежную сепарацию жидкости после контакта.

Описание устройства

При всех достоинствах предлагаемого устройства имеется потенциал увеличения эффективности за счет создания дополнительной зоны контакта. Например, можно отогнуть элемент от стенки сливного стакана. Это позволит организовать растекание жидкости по боковой стенке, что повысит не только площадь поверхности контакта, но и диапазон устойчивой работы. Авторы статьи предлагают конструкцию струйно-пленочного контактного устройства с искусственной неровностью на вертикальной перегородке (рис. 1). Искусственная неровность представляет собой прямоугольник с высотой h шириной l , отогнутый на 90° и закрученный под определенным радиусом R .

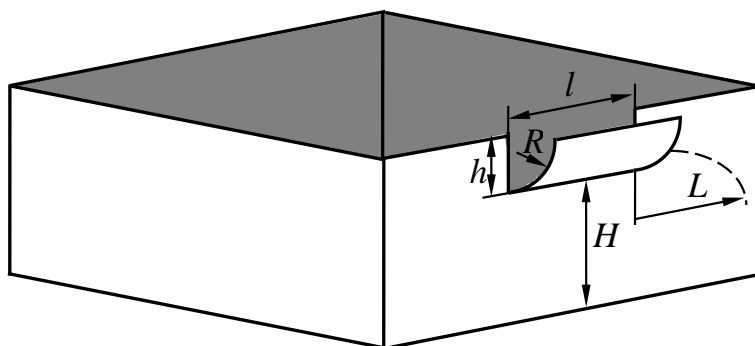


Рис. 1. Контактное устройство с рабочим участком:

H – высота участка стекания жидкости; L – ширина отклонения жидкости; l – ширина рабочего участка; h – высота рабочего участка; R – радиус загиба рабочего участка

С целью исследования влияния геометрических параметров рабочего участка контактного устройства (при $h=10$ и 15 мм, $l=5$; 10 и 15 мм, $R=5$ мм) на растекание жидкости вдоль поверхности вертикальной перегородки была разработана экспериментальная установка (рис. 2).

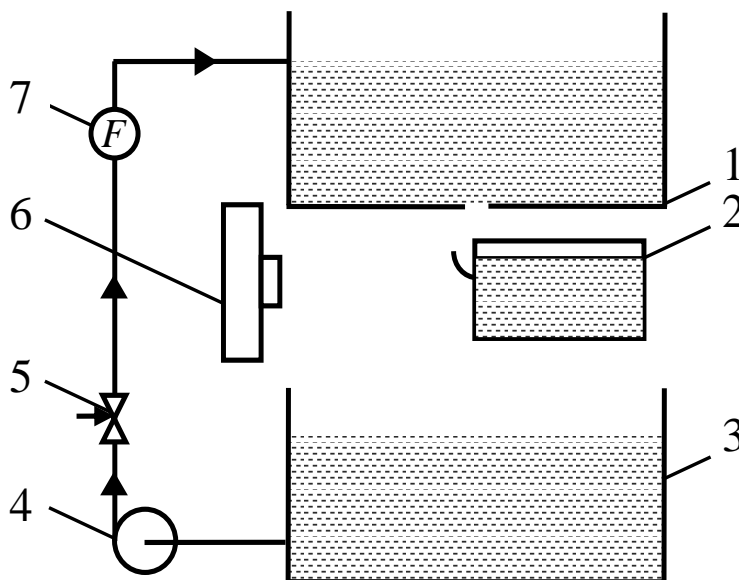


Рис. 2. Аппарат со струйно-пленочным контактным устройством:

1 – емкость для слива жидкости; 2 – контактное устройство с рабочим участком; 3 – емкость для сбора жидкости; 4 – насос для прокачки жидкости; 5 – клапан; 6 – цифровой фотоаппарат; 7 – расходомер

Для исследования течения воды по твердой поверхности был использован метод фото- и видеофиксации. Установка состоит из двух емкостей: для слива 1 (с отверстием $D=10$ мм) и сбора жидкости 3; контактного устройства с искусственной неровностью на вертикальной перегородке 2; насоса 4 фирмы *OASIS CRP 15/9* для закачки жидкости в емкость 1. Регулирующий клапан 5 необходим для управления расходом жидкости, а расходомер 7 фирмы *LOUCHEN ZM FS300A G3/4"*, с погрешностью $\pm 5\%$, – для учета расхода воды. Фотофиксация эксперимента проводилась цифровым фотоаппаратом 6 *Nikon D3100 kit18-55*.

Экспериментальная часть и обсуждение результатов исследований

Вода, вытекающая из отверстия $D=10$ мм емкости I со скоростью $w_{\text{воды}}=0,22$ м/с, стекала по месту сгиба рабочего участка контактного устройства в емкость для сбора жидкости 3 . Характер растекания воды по поверхности перегородки контактного устройства был зафиксирован фотоаппаратом с функцией серийной съемки 3 кадр/с, фокусным расстоянием 40 мм с погрешностью $\pm 15\%$.

Полученные фотоматериалы оцифровались с помощью компьютерного приложения *GetData Graph Digitizer* с последующим переводом полученных результатов в формат *MS Excel*.

На основании полученных результатов построены графики. В связи с тем, что растекание жидкости происходило в основном симметрично, результаты исследований представлены по правой части от рабочего участка пластины. Было обнаружено, что наибольшая площадь растекания пленки шириной, в среднем, 10–12 мм наблюдается на расстоянии 10–20 мм по высоте участка стекания (рис. 3–5).

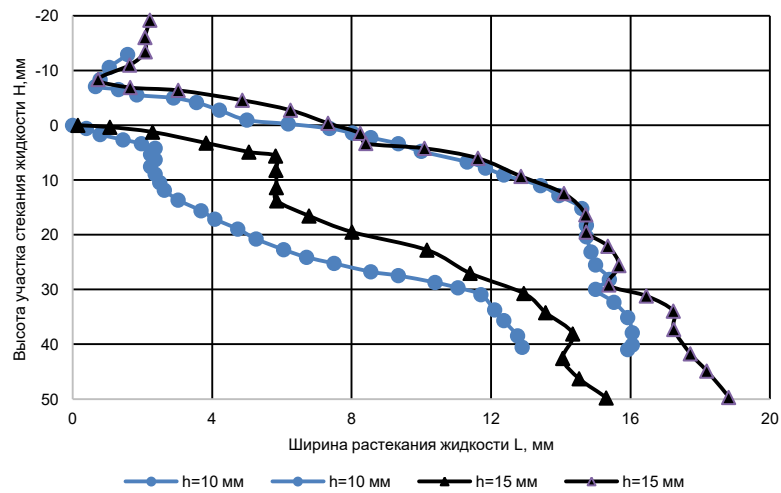


Рис. 3. Площадь растекания пленки при $l=5$ мм

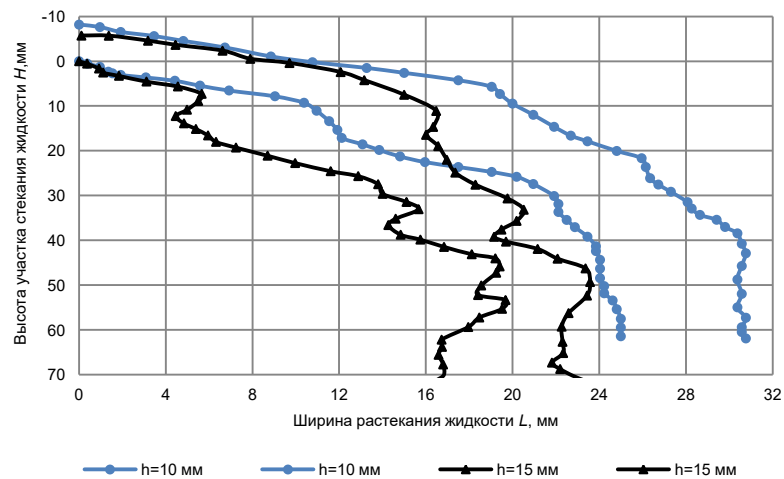


Рис. 4. Площадь растекания пленки при $l=10$ мм

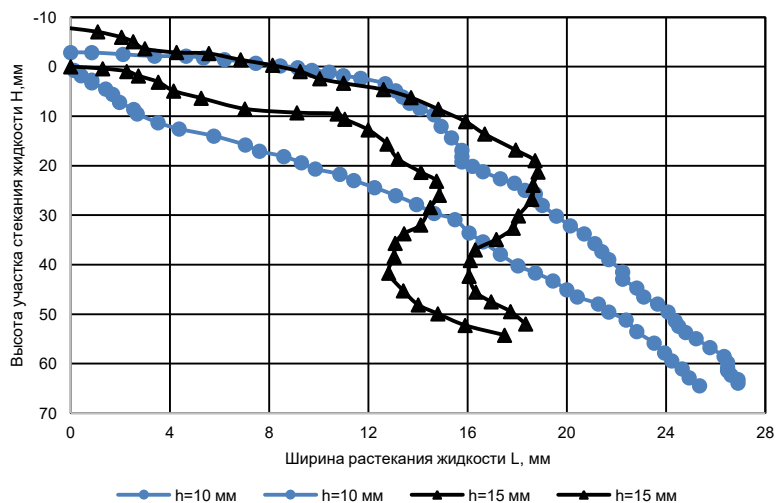


Рис. 5. Площадь растекания пленки при $l=15$ мм

На рис. 6 показана зависимость отклонения жидкости от оси рабочего участка при различной ширине рабочего участка l . Наименьшее значение отклонения получено при $l=5$ мм, связано с тем, что диаметр стекающей струи жидкости в 2 раза больше ширины горизонтального уступа искусственной неровности, которая не оказывает существенного влияния на основную часть потока, причем значения отклонения практически одинаковы для обоих случаев: как при $h=10$ мм, так и при $h=15$ мм. Дальнейшее увеличение ширины рабочего участка ($l=10$ мм) показало увеличение отклонения: в случае с $h=10$ мм практически в 2 раза, а с $h=15$ мм только в 1,3 раза. В третьей точке эксперимента при $l=15$ мм отклонения уменьшились в 1,2 раза для обоих случаев. Данное снижение можно объяснить соотношением D/l : так при более широкой ширине уступа относительно диаметра стекающей струи жидкости основная ее часть стекает во внутреннюю часть контактного устройства. Также необходимо отметить, что при $l=10$ и 15 мм наблюдается общая закономерность, заключающаяся в том, что отклонение при $h=10$ мм в 1,3 раза больше, чем при $h=15$ мм, что связано с уменьшением угла обтекания рабочего участка.

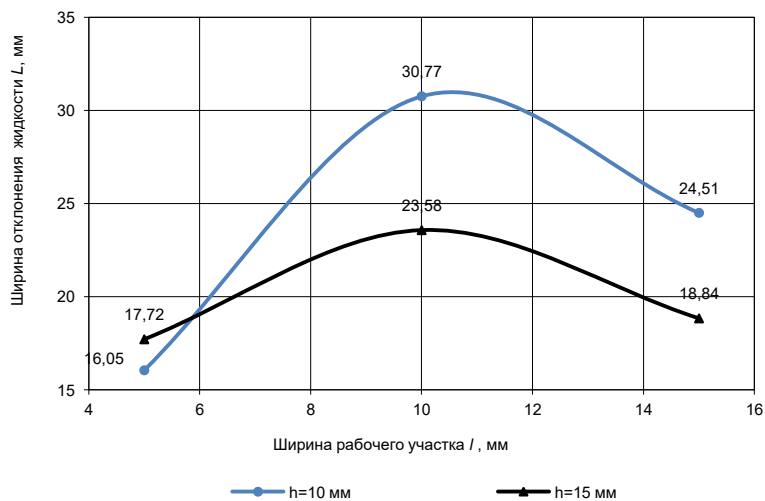


Рис. 6. Зависимость L от l

Проведенные исследования продемонстрировали для данной конструкции струйно-пленочного контактного устройства с искусственной неровностью на вертикальной перегородке, что наибольшая площадь растекания пленки наблюдается на расстоянии 10 – 20 мм по высоте участка стекания. На отклонение жидкости от оси края рабочего участка большое значение имеет отношение D к l : так наиболее эффективным является отношение 1:1. Увеличение высоты рабочего участка h приводит к уменьшению угла отклонения при обтекании горизонтального уступа искусственной неровности, что приводит к снижению его эффективности.

Вывод

Таким образом, предложенная конструкция контактного устройства позволяет существенно увеличить удельную площадь контакта жидкой и газовой фаз на боковых стенках струйно-пленочных контактных устройств, без увеличения его металлоемкости и экономических затрат. Реализация данного конструктивного решения позволит повысить производительность теплообменного оборудования без увеличения его габаритов или уменьшить удельные энергетические затраты, что приведет к снижению себестоимости выпускаемой продукции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 16-38-60081 мол_а_дк).

Литература

1. Федеральный закон от 23.11.09 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ».
2. Madyshev I.N., Dmitrieva O.S., Dmitriev A.V., Nikolaev A.N. Assessment of change in torque of stream-bubble contact mass transfer devices // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Т. 51, № 5. С. 383–387.
3. Повтарев И.А., Блиничев В.Н., Чагин О.В., Кравчик Я. Исследование зависимости гидравлического сопротивления насадочного слоя колонного оборудования // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2006. Т. 49, № 12. С. 109–110.
4. Пушнов А.С., Каган А.М., Структура и гидродинамика колонных аппаратов с насадкой. Введение в химический инжиниринг. Санкт-Петербург: Издательство политехнического университета, 2011. 135 с.
5. Пат. 2461406 Российская Федерация, МПК В01Д 3/28 (2006.01). Массообменное контактное устройство для взаимодействия жидкости и газа / Григорян Л.Г., Игнатенков Ю.И., Лесухин С.П. № 2010147693; заявл. 22.11.2010; опубл. 20.09.2012, Бюл.№ 26.
6. Лесухин М.С., Григорян Л.Г. Создание конденсатора нового типа на базе аппарата с вертикальными контактными решетками // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2013. № 2 (38). С. 206–209.
7. Karwa N., Schmidt L., Stephan P., International Journal of Heat and Mass Transfer. № 55 (13-14) (2012).
8. Дмитриева О.С., Дмитриев А.В., Николаев А.Н. Теплообменный аппарат с комбинированной схемой взаимодействия потоков газа и жидкости в системах оборотного водоснабжения // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 11. С. 146–148.
9. Зиганшин М.Г., Ежов П.В., Дмитриев А.В. Эффективность очистки газовых выбросов парогенераторов ТЭС в аппаратах вихревого типа // Промышленная энергетика. 2008. № 9. С. 49–53.
10. Калимуллин И.Р., Дмитриев А.В. Перспективы использования абсорбентов на основе третичных аминов для повышения эффективности очистки газов в аппаратах высокой пропускной способности // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 3. С. 143–145.
11. Калимуллин И.Р., Дмитриев А.В., Николаев Н.А. Производство и применение водорода / И.Р. Калимуллин, А.В. Дмитриев, Н.А. Николаев. Казань: Российская акад. наук, Казанский науч. центр «Исследовательский центр проблем энергетики», 2008.
12. Макушева О.С., Дмитриев А.В. Оценка экономического эффекта от внедрения контактных устройств с увеличенной пропускной способностью // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 8. С. 355–357.

13. Исаев А.А., Сабанаев И.А., Дмитриев А.В. Разработка лабораторной установки по специальности «Промышленная теплоэнергетика» // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 18. С. 237–239.

15. Жумаев К.К., Аслонов С.Ш., Тухтаев Б.О. Применение регулярных насадок в контактных теплообменниках // Вопросы науки и образования. 2017. № 2. С. 28–29.

16. Moran K., Inumaru J., Kawaji M., International Journal of Multiphase Flow, № 28 (5), (2002).

17. Moshtari, E.G. Babakhani, J.S. Moghaddas, Petroleum & Coal, № 51 (1), (2009).

18. Крючков Д.А., Григорян Л.Г. Испарительное охлаждение в трёхпоточных аппаратах с вертикальными контактными решётками // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2013. № 2. С. 40–43.

19. Kholpanov L.P. Self-organization and dynamic chaos in chemical-technology and heat-exchange devices: problems and tasks // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2001. Т. 74, № 4. С. 847–858.

20. Babak V.N., Babak T.B., Kholpanov L.P. A study of the absorption of carbon dioxide with solutions of amines with the straight flow of a gas and a liquid in planar irrigated channels // Теоретические основы химической технологии. 1993. Т. 27. № 6. С. 576–585.

Авторы публикации

Шарипов Ильнар Ильдарович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Круглов Леонид Вадимович – старший преподаватель кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Круглов Вадим Игоревич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Дмитриева Оксана Сергеевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химической технологии» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ).

References

1. Federal Law of 23.11.09 № 261-FZ "On energy conservation and on improving energy efficiency and on introducing amendments to certain legislative acts of the Russian Federation".

2. Madyshev I.N., Dmitrieva O.S., Dmitriev A.V., Nikolaev A.N. Assessment of change in torque of stream-bubble contact mass transfer devices // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Т. 51, № 5. С. 383–387.

3. Povtarev IA, Blinichev VN, Chagin OV, Kravchik Y. Investigation of the dependence of the hydraulic resistance of the packed column equipment column // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Series: Chemistry and Chemical Technology. 2006. P. 49, No. 12. P. 109–110.

4. Pushnov AS, Kagan AM, Structure and hydrodynamics of column apparatus with a nozzle. Introduction to chemical engineering. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2011. 135 c.

5. Grigoryan LG, Ignatenkov Yu.I., Lesukhin S.P. Mass exchange contact device for fluid and gas interaction // Patent for invention RUS 2461406 22.11.2010.

6. Lesukhin MS, Grigoryan LG Creation of a new type of condenser based on the apparatus with vertical contact grids // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Engineering. 2013. No. 2 (38). Pp. 206–209.

7. Karwa N., Schmidt L., Stephan P., International Journal of Heat and Mass Transfer. № 55 (13-14) (2012).

8. Dmitrieva OS, Dmitriev AV, Nikolaev AN Heat and mass transfer device with a combined scheme of interaction of gas and liquid flows in systems of recycled water supply // Bulletin of Kazan Technological University. 2012. Т. 15, No. 11. P. 146–148.

9. Ziganshin MG, Ezhov PV, Dmitriev A.V. Efficiency of purification of gas emissions of steam generators of thermal power plants in vortex-type devices // *Industrial power*. 2008. № 9. P. 49–53.

10. Kalimullin IR, Dmitriev A.V. Prospects for the use of tertiary amine absorbers to improve the efficiency of gas purification in high-throughput devices // *Bulletin of Kazan Technological University*. 2011. № 3. P. 143–145.

11. Kalimullin IR, Dmitriev AV, Nikolaev NA Production and application of hydrogen / I.R. Kalimullin, A.V. Dmitriev, N.A. Nikolayev; Kazan: Russian Acad. Sciences, Kazan Scientific. center "Research Center for Energy Problems", 2008.

12. Makusheva OS, Dmitriev A.V. Estimation of the economic effect from the introduction of contact devices with increased capacity // *Bulletin of Kazan Technological University*. 2011. № 8. P. 355–357.

13. Isaev AA, Sabanayev IA, Dmitriev A.V. Development of a laboratory installation for the specialty "Industrial Heat and Power Engineering" // *Bulletin of Kazan Technological University*. 2013. V. 16, No. 18. P. 237–239.

15. Zhumaev KK, Aslonov S.Sh., Tukhtaev B.O. Application of regular nozzles in contact heat and mass transfer apparatuses // *Problems of science and education*. 2017. № 2. P. 28–29.

16. Moran K., Inumaru J., Kawaji M., *International Journal of Multiphase Flow*, № 28 (5), (2002).

17. Moshtari, E.G. Babakhani, J.S. Moghaddas, *Petroleum & Coal*, № 51 (1), (2009).

18. Kryuchkov DA, Grigoryan LG Evaporative cooling in three-flow apparatus with vertical contact grids // *Oil refining and petrochemistry. Scientific and technical achievements and best practices*. 2013. № 2. P. 40–43.

19. Kholpanov L.P. Self-organization and dynamic chaos in chemical-technology and heat-exchange devices: problems and tasks // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2001. T. 74, № 4. C. 847–858.

20. Babak V.N., Babak T.B., Kholpanov L.P. A study of the absorption of carbon dioxide with solutions of amines with the straight flow of a gas and a liquid in planar irrigated channels // *Theoretical basis of chemical technology*. 1993. Vol. 27. № 6. P. 576–585.

Authors of the publication

Sharipov Ilnar Ildarovich - cand. tech. Sci., Associate Professor, Theoretical Foundations of Heat Engineering, Kazan State Power Engineering University.

Kruglov Leonid Vadimovich - Senior Lecturer of the Department Theoretical Foundations of Heat Engineering Kazan State Energy University.

Kruglov Vadim Igorevich - Cand. tech. Sci., Associate Professor of the Department Theoretical Foundations of Heat Engineering Kazan State Power Engineering University.

Dmitrieva Oksana Sergeevna - Cand. tech. in Economics, Associate Professor of the Department of Processes and Devices of Chemical Technology of Kazan National Research Technological University.

Поступила в редакцию

30 мая 2018 г.