

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

DOI: 10.15593/2224-9400/2018.2.11

УДК 66.015.23

Д.А. Земцов, И.В. Земцова, Ю.А. Иванова, Н.А. Войнов

Сибирский государственный университет науки и технологий
им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕКТИФИКАЦИИ НА ВИХРЕВОЙ СТУПЕНИ

В настоящее время контактные ступени для процесса ректификации в большей мере исчерпали свои возможности. При этом разделение многокомпонентных смесей путем ректификации продолжает быть актуальным. Повышение эффективности, производительности и других технологических факторов процесса требует поиска новых, научно обоснованных подходов и решений.

Используемые при ректификации смеси, в основном многокомпонентные, трудно разделяемы, подвергаются термическому распаду при длительном воздействии температуры и деструкции с образованием на греющих поверхностях отложений. Протекающие при этом химические процессы оказывают отрицательное влияние на выход и качество продукта, что требует проведения процесса ректификации при низкой температуре и давлении, которые при адиабатической ректификации не всегда возможно осуществить.

При термической ректификации разделение смеси сопровождается подводом тепла на контактные ступени либо его отводом, теплообменными устройствами, для обеспечения процессов испарения и конденсации в системе. Этот метод имеет определенный практический интерес и помимо повышения эффективности процесса, по некоторым данным, позволяет снижать энергозатраты.

В работе представлены результаты исследования процесса ректификации на вихревой контактной ступени. Показано, что частичная конденсация поднимающихся паров смеси этанол–вода интенсифицирует процесс укрепления смеси до трех раз, в сравнении с адиабатической ректификацией. Установлены параметры процесса, интенсифицирующие тепломассоперенос при термической ректификации. Получены зависимости для определения эффективности вихревой ступени при адиабатной и термической ректификации.

Ключевые слова: термическая ректификация, парциальная конденсация, вихревая ступень, флегма, дистиллят.

D.A. Zemtsov, I.V. Zemtsova, Yu.A. Ivanova, N.A. Voinov

Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russian Federation

STUDY OF THERMAL RECTIFICATION AT THE VORTEX STAGE

At present, the contact steps for the rectification process have exhausted their capabilities to a greater extent. At the same time, the separation of multicomponent mixtures by rectification continues to be relevant. Increasing the efficiency, productivity and other technological factors of the process requires the search for new, scientifically based approaches and solutions.

The mixtures used in the rectification, mainly multi-component ones, are difficult to separate, are subjected to thermal decomposition during long-term exposure to temperature and destruction with the formation of deposits on the heating surfaces. The resulting chemical processes have a negative effect on the yield and quality of the product, which requires a rectification process at low temperature and pressure, which, with adiabatic rectification, is not always possible.

In thermal rectification, the separation of the mixture is accompanied by the supply of heat to the contact stage, or by its removal, by heat exchangers, to ensure evaporation and condensation in the system. This method has a certain practical interest, and in addition to increasing the efficiency of the process, according to some data, it allows to reduce energy costs.

The paper presents the results of a study of the process of rectification on a vortex contact stage. It is shown that the partial condensation of the rising vapors of the ethanol-water mixture intensifies the process of strengthening the mixture to three times, in comparison with the adiabatic rectification. The process parameters, which intensify heat and mass transfer during thermal rectification, are established. Dependences are obtained for determining the efficiency of the vortex stage for adiabatic and thermal rectification.

Keywords: *thermal rectification, partial condensation, vortex step, phlegm, distillate.*

Для увеличения эффективности ступеней при ректификации наибольший интерес представляют установки со встроенными дефлегматорами на ступенях, обеспечивающие частичную конденсацию поднимающихся паров и образование флегмы с заданной температурой. При таком конструктивном оформлении тепловые потоки в колоннах адиабатической и термической ректификации при прочих равных условиях примерно одинаковы. Поддержание оптимальных гидродинамических параметров каждой ступени в колоннах термической ректификации, вследствие уменьшения расхода пара и рабочей жидкости по их высоте, может быть обеспечено уменьшением количества контактных устройств на ступени или изменением их конструктивных параметров, а регулирование потоков жидкости в колонне возможно путем интенсификации теплообмена в дефлегматорах.

Преимуществом колонн термической ректификации помимо их высокой эффективности является снижение капитальных затрат, сопротивление, а также возможность регулирования процесса разделения потоком теплоносителя.

Для многотоннажных производств колонны термической ректификации целесообразно конструировать с максимальным использованием как массообмена на ступени, так и термических эффектов. В колоннах, предназначенных для работы под разрежением, необходимо использовать термические эффекты разделения, которые не приводят к росту сопротивления колонны.

Для создания производительных колонн на основе термической ректификации использование новых конструкций, модернизированных барботажных и насадочных аппаратов, уже не обеспечивает существенного повышения удельной производительности, эффективности и технологической гибкости установок. В этой связи наиболее перспективными контактными ступенями являются вихревые [1–8]. Вращение потоков способствует дроблению пузырьков газа на ступени и предотвращает капельный унос. Вихревые ректификационные колонны не уступают по своим массообменным параметрам установкам насадочного типа, однако более производительны, менее металлоемки и масштабируемы, а наложение на процесс массообмена эффектов, вызванных термической ректификацией, позволяет существенно повысить их эффективность.

В связи с этим целью работы является интенсификация процесса разделения на вихревой ступени за счет проведения процесса термической ректификации на ней.

Экспериментальная часть. Исследовалась смесь этиловый спирт–вода с начальной концентрацией этанола в кубе 0,5–75 мас. %. Плотность жидкости составила 789–1000 кг/м³, динамический коэффициент вязкости жидкости – $(0,7–1,35) \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Относительная летучесть смеси составила от 10,5–1,6, тангенс угла наклона равновесной линии (m) составил 9,8–0,5.

Состав представленных смесей определялся с использованием хромато-масс-спектрометра «Хроматек Кристалл-5000» (колонка – 30 м, 0.25 мм-D-HP-58), а также при помощи рефрактометра марки LR-3 Polskie Zaklady Optyczne, WKC Warszawa и стеклянного спиртометра ГОСТ 18481–81.

Концентрация этанола измерялась в паровой и жидкой фазах. Показания температуры определялись термометрами сопротивления марки ТСМв, при помощи вторичных приборов «Термодат 11М2». Те-

пловой поток выходящей из куба паровой смеси составил (1–10) кВт. Изменение теплового потока регулировалось изменением напряжения в сети питания ТЭН куба с помощью регулятора напряжения.

Измерение гидравлического сопротивления ступени проводилось дифференциальным манометром.

Величина коэффициента теплоотдачи при конденсации пара на поверхности дефлегматора рассчитывалась согласно методике [9].

Расход воды, подаваемой в установку, измерялся ротаметрами типа РС–5 и РС–3.

В ходе исследований проводились измерения расхода и концентрации легколетучего компонента в парах и жидкости на входе и выходе из системы.

Эффективность контактной ступени определялась по формуле Мерффри:

$$E_y = \frac{y_k - y_n}{y^* - y_n} \quad (1)$$

где y_n – состав пара, поступающей на ступень, мас. %; y_k – состав пара, выходящего со ступени, мас. %; y^* – состав пара, равновесный с составом соответствующей фазы, поступающей на ступень, мас. %.

Термические эффекты на вихревых ступенях изучались на установке, представленной на рис. 1, а.

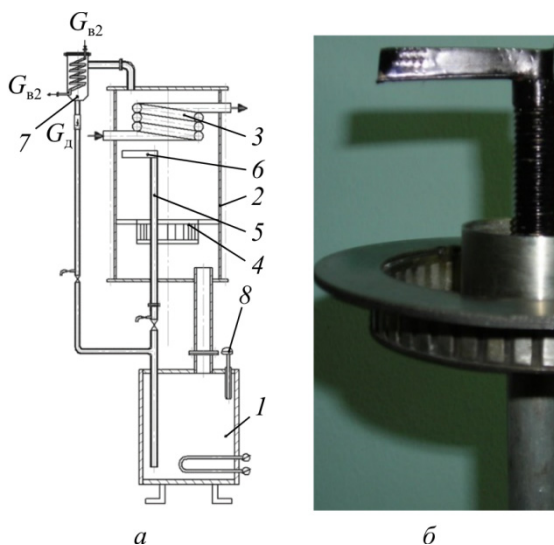


Рис. 1. Схема установки (а): 1 – куб; 2 – корпус;
3 – дефлегматор; 4 – вихревая ступень (б); 5 – переток;
6 – скребок; 7 – конденсатор; 8 – термометр

В этом случае ячейка состоит из дефлегматора в виде медного змеевика с поверхностью теплообмена $0,01 \text{ м}^2$, установленного над вихревой ступенью. Завихритель с 36 прямыми каналами шириной 2 мм, высотой 8 мм и длиной 3 мм. При работе ступени, конденсат под действием центробежной силы вращается на стенке корпуса. Достигнув определенной высоты воронки, отработанный конденсат удаляется из рабочей зоны скребком 6 и уходит в куб по перетоку 5.

Результаты и их обсуждение. Схемы подключения воды в дефлегматор исследованных вихревых ступеней представлены на рис. 2.

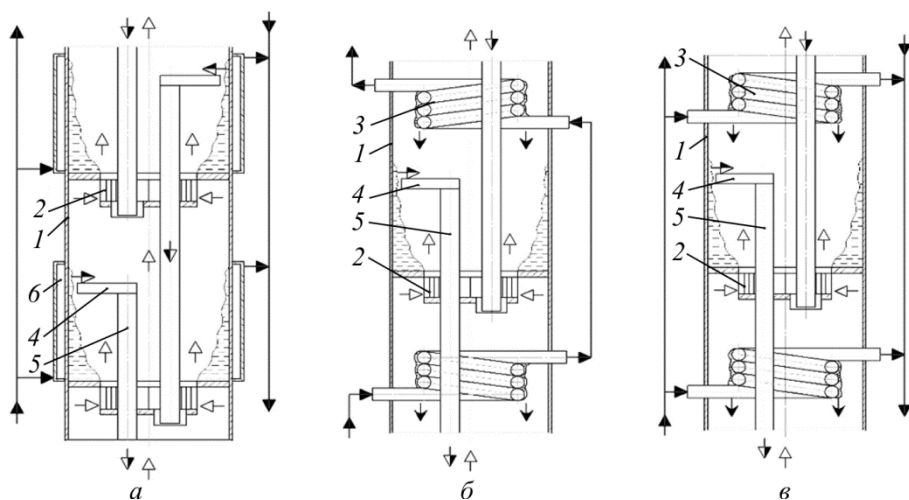


Рис. 2. Схемы потоков и подключения охлаждающей воды: а – параллельный подвод воды в рубашку; б – последовательный подвод воды в змеевик; в – параллельный подвод воды в змеевик; 1 – корпус; 2 – завихритель; 3 – конденсатор; 4 – сливная планка; 5 – переток; 6 – рубашка; $\rightarrow$ – вода; $\rightarrow$ – пар; $\rightarrow$ – рабочая смесь; $\rightarrow$ – конденсат

Адиабатическая ректификация. Зависимость эффективности контактной вихревой ступени от скорости пара в каналах завихрителя при адиабатной ректификации представлена на рис. 3. При кольцевом гидродинамическом режиме, когда газожидкостная смесь приобретает вращательное движение, достигнута наибольшая эффективность ступени, что обусловлено высокой межфазной поверхностью [7, 8].

С уменьшением концентрации этанола на ступени (см. рис. 3), или увеличением тангенса угла наклона равновесной кривой, эффективность вихревой ступени при адиабатической ректификации возрас-

тает по закону $E_y \approx m^{0,16}$, что согласуется с данными [10, 11]. При этом согласно данным, представленным на рис. 4, $E_y \approx (G/L)^{-0,15}$.

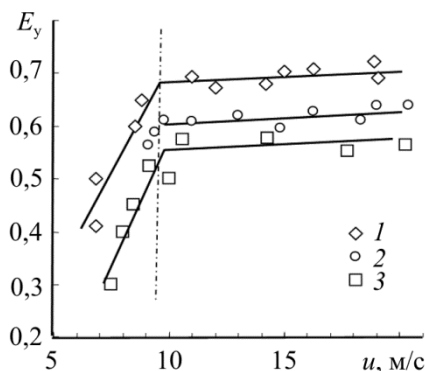


Рис. 3. Зависимость эффективности ступени от скорости пара в каналах завихрителя при вариации концентрации этанола при $H = 0,055$ м, $V = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м³, $R = 2 \dots 4,5$. Экспериментальные точки: 1 – $x = 20$ мас. %; 2 – $x = 30$ мас. %; 3 – $x = 65$ мас. %; пунктирная линия – граница перехода из барботажного в кольцевой режим

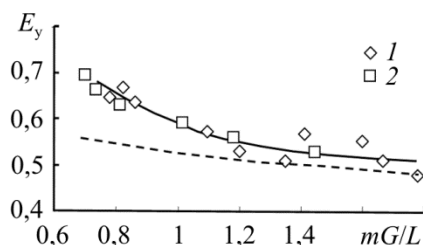


Рис. 4. Зависимость эффективности контактных ступеней от параметра G/L при $m = 0,7$ и $V = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м³. Экспериментальные точки: 1 – вихревая ступень; 2 – данные работы [12]; пунктирная линия – расчет по уравнению $E_y = N_y / (1 + N_y)$ [120]

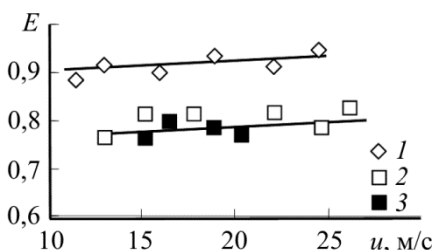


Рис. 5. Зависимость эффективности контактной ступени при абсорбции и ректификации от скорости газа в каналах завихрителя. Экспериментальные точки при абсорбции: 1 – $H = 0,1$ м, $V = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м³; 2 – $H = 0,055$ м, $V = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м³; при ректификации 3 – $H = 0,055$ м, $V = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м³, $x = 4$ мас. %

При низких концентрациях этанола в жидкости ($x < 5$ мас. %), когда основное сопротивление массопереносу смеси этанол–вода сосредоточено в жидкой фазе [13], эффективность ступени при ректификации E_y и эффективность при физической абсорбции E практически одинаковы (рис. 5, точки 2 и 3).

В этой связи можно предположить, что в области низких концентраций этанола в жидкости влияние эффектов испарения на ступени не существенно, по сравнению с интенсификацией процесса ректификации путем турбулизации фаз.

Основываясь на исследованиях массообмена при абсорбции на вихревых ступенях [14] и данных, полученных при ректификации, зависимость для расчета эффективности ступени в кольцевом режиме при адиабатической ректификации представлена в виде

$$E_y = 0,035 m^{0,16} (G/L)^{-0,15} (H/h)^{0,4} (Re)^{0,24}, \quad (2)$$

где E_y – эффективность ступени по паровой фазе; m – тангенс угла наклона равновесной кривой смеси; G – расход паровой фазы, кг/с; L – расход жидкой фазы, кг/с.

Центробежный критерий Рейнольдса при этом составил 5000–15000, а угловая скорость вращения газожидкостной смеси принималась согласно [14].

Термическая ректификация. Как показали исследования, подвод теплоносителя в рубашки (см. рис. 2, а), размещенные на наружной поверхности царги, с целью нагревания или охлаждения рабочей жидкости на ступени не позволил существенно интенсифицировать процесс укрепления смеси этанол–вода. Увеличение эффективности контактной ступени составило не более 0,1. Аналогичный результат был получен в работе [15].

Осуществление подачи охлаждающей воды в конденсаторы по схеме, представленной на рис. 2, б, оказалось не эффективным, по причине наличия значительной разницы температуры теплоносителя и паров поднимающейся смеси.

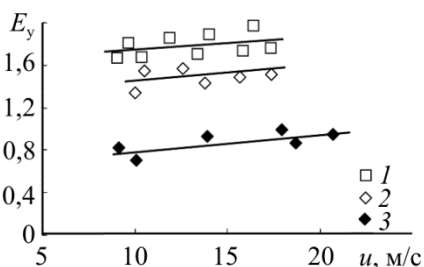


Рис. 6. Зависимость эффективности контактной ступени от скорости пара в каналах завихрителя при термической ректификации при $R = 3$, $\Delta t = 10 \dots 20$ °С. Экспериментальные точки: 1 – $x = 65 \dots 70$ мас. %; 2 – $x = 30$ мас. %; 3 – $x = 20$ мас. %

Наибольшая эффективность достигалась при подключении охлаждающей воды в конденсаторы по схеме рис. 2, в.

В этом случае эффективность контактной ступени в области высоких концентраций этанола в смеси по сравнению с адиабатической ректификацией увеличилась до 3 раз (рис. 6), по причине наиболее близких значений разницы температуры теплоносителя и паров поднимающейся смеси. Поскольку эффективность ступени, рассчитанная по уравнению (1), оказалась

больше единицы, можно предположить, что на вихревых ступенях образуется несколько областей тепломассообмена.

Отношение величин эффективности ступени при термической и адиабатической ректификации от тангенса угла наклона равновесной кривой представлено на рис. 7. Как видно, влияние воздействия термических эффектов на эффективность ступени при ректификации становится незначительным при $m > 4,5$ или концентрации этанола в смеси $x < 5$ мас. %.

Оценить величину эффективности ступени с вихревыми контактными устройствами при термической ректификации можно по уравнению (3) и зависимости, представленной на рис. 7, согласно

$$E_y^{ther} = [1,9m^{-0,36}] E_y^{ad}, \quad (3)$$

где E_y^{ther} – эффективность при термической ректификации; E_y^{ad} – эффективность при адиабатной ректификации

Таким образом, при использовании термической ректификации в сочетании с высокими массообменными характеристиками ступени возможно увеличение эффективности ступени до 3 раз.

Список литературы

1. Шагивалеев А.А., Николаев Н.А. Ректификация смеси этанол–вода в аппарате с прямоточно-вихревыми контактными устройствами // Хранение и переработка сельхозсырья. – М.: Пищ. пром-ть, 2001. – № 7. – С. 14–17.
2. Савельев Н.И. Расчет эффективности массопереноса в прямоточно-вихревых контактных устройствах с тангенциальными завихрителями / Н.И. Савельев [и др.] // Химия и химическая технология. – 1984. – Т. 27. – 167 с.
3. Гидродинамические закономерности в массообменном аппарате вихревого типа / Ю.Ф. Коротков [и др.] // Труды Казан. хим.-технол. ин-та. – 1970. – Вып. 45. – С. 26–31.

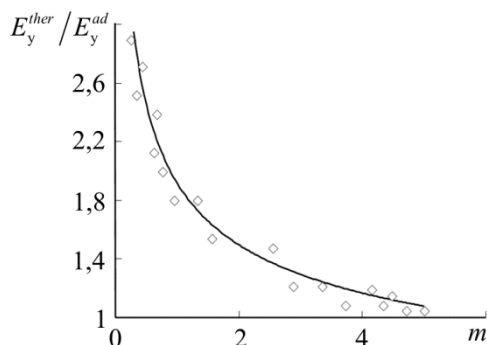


Рис. 7. Зависимость отношения эффективности вихревой контактной ступени при кольцевом режиме, при термической и адиабатной ректификации от тангенса угла наклона равновесной кривой при разности температур пара на ступени и теплоносителя в конденсаторе $\Delta t = 8 \dots 15$ °С

4. Сабитов С.С. Исследование массопереноса в аппаратах прямоточно-вихревого типа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 1979. – 16 с.

5. Трачук А.В. Исследование и разработка вихревых аппаратов с вращающимся многофазным слоем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. – Новосибирск, 2009. – 25 с.

6. Гидродинамика и массообмен в вихревой ректификационной колонне / Н.А. Войнов, Н.А. Николаев, А.В. Кустов // Химическая промышленность. – 2008. – № 4. – С. 730–735.

7. Вихревая контактная ступень для бражных колонн / Н.А. Войнов, С.А. Ледник, О.П. Жукова // Химия растительного сырья. – 2011. – № 4. – С. 295–300.

8. Тепломассообмен на вихревой контактной ступени / Н.А. Войнов, С.А. Ледник, О.П. Жукова // Химия растительного сырья. – 2012. – № 4. – С. 209–213.

9. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.

10. Александров И.А., Гройсман С.А. Тепло- и массообмен при ректификации в барботажном слое // Теоретические основы химической технологии. – 1975. – № 1(9). – С. 11–19.

11. Николаев Н.А. Эффективность процессов ректификации и абсорбции в многоступенчатых аппаратах с прямоточно-вихревыми контактными устройствами. – Казань: Отечество, 2011. – 122 с.

12. Hydrodynamics of the vortex stage with tangential swirlers / N.A. Voinov, O.P. Zhukova, N.A. Nikolaev // Theor. Found. Chem. Eng. – 2010. – Vol. 44, № 2. – P. 213–219.

13. Теплоотдача при конденсации и кипении в пленочном трубчатом испарителе / Н.А. Войнов, О.П. Жукова, А.Н. Николаев // Теорет. основы хим. технологии. – 2012. – Т. 46, № 3. – С. 1–9.

14. Mass transfer in gas-liquid layer on vortex contact stages / N.A. Voinov, O.P. Zhukova, S.A. Lednik // Theor. Found. Chem. Eng. – 2013. – Vol. 47, № 1. – P. 62–67.

15. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) / В.М. Олевский, В.Р. Ручинский, А.М. Кашников, В.И. Чернышев. – М.: Химия, 1988. – 240 с.

References

1. Shagivaleev A.A., Nikolaev N.A. Rektifikatsiia smesi etanol-voda v apparate s priamotochno-vikhrevymi kontaktnymi ustroistvami [Rectification of ethanol-water mixture in the device with direct-vortex contact devices]. *Khranenie i pererabotka sel'khoz syr'ia*, 2001, no. 7, pp. 14–17.

2. Savel'ev N.I. Raschet effektivnosti massoperenosa v priamotochno-vikhrevykh kontaktnykh ustroistvakh s tangentsial'nymi zavikhriteliami [Calculation of the efficiency

of mass transfer in direct-vortex contact devices with tangential swirlers]. *Khimiia i khimicheskaiia tekhnologiia*, 1984, vol. 27, 167 p.

3. Korotkov Iu.F. Gidrodinamicheskie zakonomernosti v massoobmennom apparate vikhrevogo tipa [Hydrodynamic regularities in a mass-transfer apparatus of the vortex type]. *Trudy Kazanskogo khimiko-tekhnologicheskogo institute*, 1970, iss. 45, pp. 26-31.

4. Sabitov S.S. Issledovanie massoperenosa v apparatakh priamotochno-vikhrevogo tipa [The study of mass transfer in devices of direct-vortex type]. Abstract of Ph.D. thesis. Kazan, 1979, 16 p.

5. Trachuk A.V. Issledovanie i razrabotka vikhrevykh apparatov s vrashchaiushchimsia mnogofaznym sloem [Research and development of vortex devices with a rotating multiphase layer]. Abstract of Ph. D. thesis. Novosibirsk, 2009, 25 p.

6. Voinov N.A., Nikolaev N.A., Kustov A.V. Gidrodinamika i massoobmen v vikhrevoi rektifikatsionnoi kolonne [Hydrodynamics and mass transfer in the vortex distillation column]. *Khimicheskaiia promyshlennost'*, 2008, no. 4, pp. 730–735.

7. Voinov N.A., Lednik S.A., Zhukova O.P. Vikhrevaia kontaktnaia stupen' dlia brazhnykh kolonn [Vortex contact stage for columns]. *Khimiia rastitel'nogo syr'ia*, 2011, no. 4, pp. 295-300

8. Voinov N.A., Lednik S.A., Zhukova O.P. Teplomassoobmen na vikhrevoi kontaktnoi stupeni [Heat and mass transfer at the vortex contact stage]. *Khimiia rastitel'nogo syr'ia*, 2012, no. 4, pp. 209-213.

9. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha [Heat transfer]. Moscow, Energiia, 1975, 488 p.

10. Aleksandrov I.A., Groisman S.A. Teplo – i massoobmen pri rektifikatsii v barbotazhnom sloe [Heat – and mass transfer during rectification in the bubbling layer]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*, 1975, no. 1(9), pp. 11-19.

11. Nikolaev N.A. Effektivnost' protsessov rektifikatsii i absorptsii v mnogostupenchatykh apparatakh s priamotochno – vikhrevymi kontaktnymi ustroistvami [Efficiency of rectification and absorption processes in multistage apparatus with direct-vortex contact devices]. Kazan, Otechestvo, 2011, 122 p.

12. Voinov N.A., Zhukova O.P., Nikolaev N.A. Hydrodynamics of the vortex stage with tangential swirlers. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2010, vol. 44, no. 2, pp. 213-219.

13. Voinov N.A., Zhukova O.P., Nikolaev N.A. Teplootdacha pri kondensatsii i kipenii v plenochnom trubchatom isparitele [Heat transfer during condensation and boiling in a film tube evaporator]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*, 2012, vol. 46, no. 3, pp. 1-9.

14. Voinov N.A., Zhukova O.P., Lednik S.A. Mass transfer in gas-liquid layer on vortex contact stages. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2013, vol. 47, no. 1, pp. 62-67.

15. Olevskii V.M., Ruchinskii V.R., Kashnikov A.M., Chernyshev V.I. Plenochnaia teplo – i massoobmennaiia apparatura [Film heat and mass transfer equipment]. Moscow, Khimiia, 1988, 240 p.

Получено 05.03.2018

Об авторах

Земцов Денис Андреевич (Красноярск, Россия) – кандидат технических наук, ассистент кафедры машин и аппаратов промышленных технологий Сибирского государственного университета науки и технологий имени М.Ф. Решетнева (660049, г. Красноярск, ул. Краснодарская, 39-129, e-mail: denis_zemtsov.92@mail.ru).

Земцова Илона Викторовна (Красноярск, Россия) – магистрант кафедры машин и аппаратов промышленных технологий Сибирского государственного университета науки и технологий имени М.Ф. Решетнева (660049, г. Красноярск, ул. Краснодарская, 39-129, e-mail: ilonkatarodubceva@mail.ru).

Иванова Юлия Анатольевна (Красноярск, Россия) – магистрант кафедры машин и аппаратов промышленных технологий Сибирского государственного университета науки и технологий имени М.Ф. Решетнева (660049, г. Красноярск, Мира пр., 82, e-mail:ivano.julia2010@yandex.ru).

Войнов Николай Александрович (Красноярск, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов промышленных технологий Сибирского государственного университета науки и технологий имени М.Ф. Решетнева (660049, г. Красноярск, ул. Ладос Кеэховелли, 28-94, e-mail: n.a.voynov@mail.ru).

About the authors

Denis A. Zemtsov (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Ph.D. Technical Sciences, Assistant of the Department of Machines and Devices of Industrial Technologies of the Siberian State University of Science and Technology named after M.F. Reshetnev (39-129, str. Krasnodarskaja, 660049, Krasnoyarsk, e-mail: denis_zemtsov.92@mail.ru).

Iлона V. Zemtsova (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Undergraduate student of the Department of Machines and Apparatuses of Industrial Technologies of the Siberian State University of Science and Technology named after M.F. Reshetnev (39-129, str. Krasnodarskaja, 660049, Krasnoyarsk, e-mail: ilonkatarodubceva@mail.ru).

Yuliya A. Ivanova (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Undergraduate student of the Department of Machines and Apparatuses of Industrial Technologies of the Siberian State University of Science and Technology named after M.F. Reshetnev (82, Mira av., 660049, Krasnoyarsk, e-mail:ivano.julia2010@yandex.ru).

Nikolay A. Voynov (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Machines and Devices of Industrial Technologies of the Siberian State University of Science and Technology named after M.F. Reshetnev (28-94, str. Lado Kechovelli, 660049, Krasnoyarsk, e-mail: n.a.voynov@mail.ru).