СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ НАСАДОК УГОЛКОВОГО ТИПА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ В МАССООБМЕННЫХ АППАРАТАХ

REGULAR SPRAY TYPE TIPS IMPROVEMENT TO REDUCE SEDIMENTS IN THE MASS-EXCHANGE APPARATUS

А.Ф. Хайруллин
Almir F. Hajrullin

Башкирский
государственный университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Bashkir State University,
Ufa, Russian Federation

М.И. Шарипов
Marsel I. Sharipov

Башкирский
государственный университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Bashkir State University,
Ufa, Russian Federation

Э.Р. Абдеев
Eldar R. Abdeev

Башкирский
государственный университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Bashkir State University,
Ufa, Russian Federation

Р.Г. Абдеев
Rinat G. Abdeev

Башкирский
государственный университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Bashkir State University,
Ufa, Russian Federation

Статья посвящена исследованию контактных устройств колонных аппаратов и созданию эффективных насадок для систем «газ — жидкость».

По результатам проведенных исследований с учетом уточненных данных по гидравлическим сопротивлениям разработана новая регулярная насадка для массообменных процессов, эффективно работающая в загрязненных средах.

В разработанной насадке оптимально подобраны ряды элементов с уточненным относительно друг друга шагом и со щелевыми зазорами между отбойной пластиной в угловых элементах.

Экспериментальные исследования проведены на разработанном лабораторном стенде, конструктивные элементы которого изготовлены из оргстекла и расположены под определенным углом друг к другу.

Исследования жидкой и газовой фаз позволили установить численные значения наименьших гидравлических сопротивлений среди угловых насадок. В результате проведенных экспериментов доказана перспективность созданной конструкции углового типа, которая обеспечивает условия снижения отложений.

На основе законов аэрогидродинамики разработаны физическая и численная модели потоков в аппарате с регулярными насадками различного типа с учетом отложения загрязнений. Проведены экспериментальные исследования на физической модели с целью определения уноса жидкости, динамической удерживающей способности и коэффициента сопротивления, выполнены верификация моделей и оптимизация параметров регулярной угловой насадки с П-образными отбойниками для обеспечения самоочистки массообменных элементов, что позволило обеспечить оптимальное функционирование колонного аппарата с минимальным уровнем отложений.

Установлены параметры, характеризующие устойчивую работу насадки и обеспечивающие самоочистку её элементов от механических и парафиносмолистых отложений, что позволило увеличить межремонтный период массообменного аппарата.

Ключевые слова

загрязнение, колонна, насадка,
удельная поверхность,
удерживающая способность,
эквивалентный диаметр,
эффективность

The article is devoted to the study of column apparatus contact devices and the creation of effective attachments for gas — liquid systems.

According to the results of the studies, taking into account the updated data on hydraulic resistances, a new regular nozzle for mass transfer processes has been developed, which effectively works in polluted environments.

In the developed nozzle, the rows of elements with the pitch refined relative to each other and with the slit gaps between the baffle plate in the corner elements are optimally selected.

Experimental studies were carried out on the developed laboratory bench, the structural elements of which are made of Plexiglas and arranged at a certain angle to each other.

Studies of the liquid and gas phases allowed to establish the numerical values of the smallest hydraulic resistance among the angle nozzles. On the basis of experiments, the viability of the created corner-type structures, which provides conditions for reducing sediments, is proved.

On the basis of aero-hydrodynamics laws, physical and numerical models of flows in the apparatus with regular nozzles of various types have been developed taking into account the deposition of contaminants. Experimental studies were carried out on the physical model in order to determine the liquid entrainment, dynamic holding capacity and resistance coefficient, model verification and parameters of a regular corner nozzle with U-shaped bump stops optimization were performed to ensure self-cleaning of mass transfer elements, which allowed for optimal functioning of the column apparatus with a minimum level of deposits.

The parameters characterizing the stable nozzle operation and ensuring the self-cleaning of its elements from mechanical and paraffin-resin deposits are established, which made it possible to increase the interper-air time of the mass-exchange apparatus.

Введение

В настоящее время нефтеперерабатывающая отрасль характеризуется увеличением объёмов добычи и переработки нефти. Перспективным направлением нефтепереработки как в России, так и за рубежом является усовершенствование существующих и разработка новых колонных устройств с целью наращивания мощности.

Одним из важных элементов массообменных колонн разделения являются контактные устройства, конструкции которых очень разнообразны. Ежегодно оформляются патенты на десятки новых регулярных контактных устройств, но все они имеют существенный недостаток — они загрязняются мехпримесями и не способны к самоочистке [1–4]. В связи с этим крайне актуальным для массообменных аппаратов является решение проблемы очистки от отложений и, следовательно, разработка новых контактных регулярных устройств, обеспечивающих уменьшение отложений.

Целью данной работы является повышение надежности и обеспечение безотказной работы массообменного аппарата путём уменьшения загрязнения элементов регулярной насадки уголкового типа за счет рациональной траектории движения потоков в насадке. На основе

Key words

pollution, column, spray type tip, specific surface, holding capacity, equivalent diameter, efficiency

законов аэрогидродинамики [5–20] разработаны физическая и численная модели потоков в аппарате с регулярными насадками различного типа с учетом отложения загрязнений.

Экспериментальная часть

При усовершенствовании конструктивных элементов насадки, функционирующей в условиях загрязненных технологических потоков, необходимо выполнить следующие условия:

— поверхности всех элементов контактного устройства должны омываться жидкой фазой для того, чтобы исключить или свести к минимуму отложения загрязняющих примесей;

— в объёме насадного слоя при движении газового и жидкого потоков в противоположных друг от друга направлениях должен обеспечиваться режим турбулизации;

— при струйно-противоточном режиме при контакте газовой и жидкой фаз на поверхности насадки жидкая фаза должна выполнять условие для интенсификации процесса массообмена.

Описание установки

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана регулярная насадка с П-образным отбойником (рисунок 1) [21–24].

В разработанной насадке оптимально подобраны ряды элементов с уточненным относительно друг друга шагом и со щелевыми зазорами между отбойной пластиной в угловых элементах.

Элементы исследованной насадки изготовлены из пластин органического стекла толщиной 1 мм и шириной 15 мм, соединенных перпендикулярно. Ширина щелевых зазоров 5 мм.

С целью проведения экспериментальных исследований насадки с П-образными отбойниками создана лабораторная установка (рисунок 2). Основная часть установки — корпус с размерами 200 × 50 × 300 мм, выполненный из оргстекла, для визуального наблюдения за всем процессом контактирующих фаз в насадочном слое.

1 — угловый элемент; 2 — щелевой зазор; 3 — отбойная пластина

Рисунок 1. Насадка угловая регулярная с П-образными отбойниками

1 — корпус; 2 — блок регулярной насадки; 3, 4 — распределители; 5, 6 — ротаметры; 7 — дифманометр; 8, 9, 11, 13 — вентили; 10, 12 — трубопроводы; 14 — насос

Рисунок 2. Схема опытной конструкции для исследования гидродинамических характеристик регулярной насадки

Внутри корпуса на опоры установлен блок для данной насадки, также из оргстекла. Подачу фаз на насадку производили через распределители, при этом расходы регистрировали ротаметрами и регулировали посредством вентилей. Перепад давлений осуществляли дифманометрами.

Для проведения лабораторных экспериментов по определению количества уноса отложений была приготовлена водно-масляная смесь с содержанием масла (моторного) в воде 10 %, 20 %, 50 %, использован отсеянный песок, с размером крупинок 0,4 мм, массой 300 г. До начала эксперимента были определены: масса уголкового насадки в «сухом» виде — 770 г, масса уголкового насадки с П-образными отбойниками — 720 г.

Первый опыт. Водно-масляная смесь с содержанием масла 10 %. Обе насадки были погружены в готовую водно-масляную смесь, нанесены загрязнения. Массы насадок с нанесенной водно-масляной смесью и песком составляли: уголкового насадки с верхней ще-

люю — 1270 г, уголкового насадки с П-образными отбойниками — 1220 г. Для определения массы насадок использовали лабораторные весы МАССА ВК-3000.1 с точностью 0,1 г. Насадки поэтапно монтировали в лабораторную установку. Процесс выполняли в течение 2, 4, 8, 12, 16, 20 и 24 ч. После каждого эксперимента насадки взвешивали.

Второй и третий опыты. Проведены аналогичные эксперименты для обеих насадок с водно-масляной смесью с содержанием масла 20 % и 50 % при различной длительности процесса (2, 4, 8, 12, 16, 20 и 24 ч).

Обсуждение результатов

В таблице 1 приведены основные геометрические характеристики насадок.

Исходя из данных таблицы 1, можно сказать, что для данных насадок вся поверхность элементов является удельной поверхностью. При увеличении значения удельной поверхности возрастают эффективность массообменного аппарата и гидравлическое сопротивление, но уменьшается производительность.

Таблица 1. Геометрические параметры насадок

Удельная поверхность a , $\text{м}^2/\text{м}^3$	Эквивалентный диаметр d_3 , м	Свободный объем $\epsilon_{\text{св}}$, д.ед.
Уголкового насадка		
45	0,03	0,955
Уголкового насадка с верхней щелью		
36	0,023	0,964
Регулярная насадка с П-образными отбойниками		
34,5	0,01	0,9655

Все пустоты, находящиеся между элементами насадки, являются свободным объемом. При возрастании свободного объема регулярной насадки увеличивается её производительность, но значение гидравлического сопротивления уменьшается, также как и эффективность работы насадки.

Эквивалентный диаметр насадки (гидравлический радиус) d_3 [м] определяется по формуле:

$$d_3 = \frac{4\epsilon}{a}. \quad (1)$$

Этот параметр в основном применяют при расчетах параметров тепло- и массообменной аппаратуры. Некоторые основные геометрические характеристики регулярных насадок были систематизированы и отражены в работе [4].

Таким образом, минимальные габариты лабораторной установки: размеры щели между насадочными элементами равны 5 мм,

размеры насадочных элементов 15 мм и диаметр колонны 150 мм.

При переходе к расчетам для промышленных колонн достаточно использовать безразмерную пропорциональную зависимость соотношений составляющих её элементов $A - B - C$, где $A = 1$ — расстояние (свободные проходы) между насадочными элементами, $B = 3$ — размеры насадочных элементов и $C = 30$ — диаметр колонны. Используя данную зависимость для насадочных элементов уголкового типа можно рассчитывать и проектировать промышленные колонные аппараты.

Для определения пропускной способности и критического значения скорости течения газовой фазы в щелевых зазорах насадки с П-образными отбойниками использовано уравнение В.В. Кафарова и А.Н. Плановского [5], применяемое для расчета критических режимных точек насадочного слоя.

В результате расчетов получаем $d_{\text{экв, угол}} = 0,01$ м, а значения постоянных коэффициентов, характеризующих угольковые насадки C_1 и C_2 , равны соответственно 0,140 и 1,085 с относительной погрешностью не более $\pm 1,5\%$.

Динамическая удерживающая способность угольковых насадок рассчитывалась по зависимости:

$$H_{\text{дин}}/Re^n \text{ от } U^m,$$

где U — удельная объемная плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;

m — показатель степени.

Расчеты динамической удерживающей способности для различных видов угловых насадок:

а) для угольковой насадки

$$H_{\text{дин}} = 0,0103 \cdot Re^{0,45} \cdot U^{0,04}; \quad (2)$$

б) для угольковой насадки с верхней щелью

$$H_{\text{дин}} = 0,0018 \cdot Re^{0,76} \cdot U^{0,09}; \quad (3)$$

в) для насадки с П-образными отбойниками

$$H_{\text{дин}} = 0,0007 \cdot Re^{0,96} \cdot U^{0,18}. \quad (4)$$

Используя зависимости (2)–(4) для расчетного определения значений динамической удерживающей способности, по рассчитанным значениям скоростного расхода газа

(W_r), [$\text{м}^3/\text{ч}$], вычислены числа Рейнольдса (Re), значения плотности орошения (U) определены экспериментально [6].

В результате проведенного анализа установлено:

а) наибольшее отклонение расчетных значений динамической удерживающей способности от экспериментальных данных получено для угольковых насадок при расходе газовой фазы $G_v = 1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$, что характерно для неустановившегося режима;

б) при расходе газовой фазы $G_v = 4 \text{ м}^3/\text{ч}$ и выше и значениях $U = 4,0\text{--}11,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ среднее отклонение расчетных значений от экспериментальных составляет 3 % для угольковой насадки, 2 % для угольковой насадки с верхней щелью и 1,5 % для насадки с П-образными отбойниками.

При проведении расчетов динамической удерживающей способности угольковых насадок для условий производства рекомендуется использовать зависимость (4). Погрешность расчетного определения значений $H_{\text{дин}}$ не превышает 1,5 % для насадки с П-образными отбойниками (рисунок 3).

В результате экспериментальных исследований установлен характер загрязнений парафиносмолистыми отложениями (рисунок 4).

значения удельной плотности орошения: 1 — $4,0 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; 2 — $7,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; 3 — $11,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

Рисунок 3. Зависимость удерживающей способности насадки с П-образными отбойниками от объемного расхода воздуха при различных значениях удельной плотности орошения

а) уголкового насадка; б) — насадка с П-образными отбойниками

Рисунок 4. Загрязнения элементов насадок

Как следует из характера загрязнений парафиносмолистыми отложениями (рисунок 4) и результатов опытов, проведенных, при различных концентрациях водно-масляной смеси и различной длительности (таблица 2), унос

мехпримесей и органических отложений из насадочных элементов при использовании уголкового насадка с П-образными отбойниками происходит эффективнее в 1,7–2 раза, чем у уголкового насадка с верхней щелью.

Таблица 2. Сравнительный анализ уноса отложений из насадок в зависимости от длительности процесса и концентрации водно-масляной смеси (масса уголкового насадка с верхней щелью до эксперимента 1270 г, масса уголкового насадка с П-образными отбойниками — 1220 г)

Длительность процесса t , ч	Разность масс насадок до и после эксперимента Δm , г		
	10 %	20 %	50 %
уголкового насадка с верхней щелью			
2	87,1	77,2	71,3
4	98,4	87,7	81,9
8	137,4	117,9	95,5
12	164,2	150,8	133,9
16	205,3	181,1	165,7
20	255,9	220,6	207,1
24	287,5	242,2	230,8
уголкового насадка с П-образными отбойниками			
2	132,6	127,4	119,8
4	207,5	185,3	169,2
8	267,3	230,7	202,3
12	378,2	294,6	238,2
16	402,7	350,2	304,8
20	457,9	412,8	384,6
24	496,8	474,8	441,3

Выводы

Для повышения условий очистки насадки уголкового типа необходимо обеспечить возможность изменения траектории потока газа путем установки над щелями отбойных пластин изогнутой кромкой вниз. Кроме того, для обеспечения самоочищения элементов на-

садки необходимо исключить возможность механических отложений путем рациональной траектории потоков жидкой и газовой фаз. Данное условие может быть реализовано при создании определенных оптимальных условий для процесса самоочистки уголковых насадок с помощью подбора определенного

расположения и определенного угла для самоочищения уголковых элементов.

При изменении конструкции контактного устройства путем добавления отбойных пластин процесс массообмена будет происходить интенсивнее, улучшится перемешивание га-

зовой и жидкой фаз, тем самым исключатся или приблизятся к минимуму отложения на элементах насадочного устройства за счет рациональной траектории в режиме турбулизации газового и жидкого потоков между уголковыми элементами.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абдуллин А.З. Разработка конструкций и метод расчета струйных насадок для массообменных процессов: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2003.
2. Фаткуллин Р.Н. Разработка двутавровой насадки для массообменных процессов в системе газ-жидкость: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2004.
3. Лисова Н.С., Глебов М.Б. Очистка хлороформсырца методами ректификации и хеморектификации // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. 31. № 1 (182). С. 83–85.
4. Криворучко М.И., Глебов М.Б. Исследование процесса очистки хлороформсырца с использованием ионной жидкости в экстракционной колонне // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 30. № 4 (173). С. 36–38.
5. Масагутов Д.Ф., Пушнов А.С., Кашапов Н.Ф. Влияние геометрических характеристик регулярных структурированных насадок на гидравлическое сопротивление и эффективность процессов тепло и массообмена // Химическая технология. 2014. Т. 15. № 96.
6. Лебедев А.Е., Зайцев А.И., Бадоев В.А. Метод определения коэффициента отражения частиц от отбойного элемента // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 340.
7. Комиссаров Ю.А., Киселев М.С. Компьютерное моделирование парожидкостного равновесия // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. 2017. Т. 19. № 1. С. 140–146.
8. Серафимов Л.А., Челюскина Т.В., Фролова А.К. Особенности математического моделирования химических и массообменных процессов // Тонкие химические технологии. 2014. Т. 9. № 5. С. 21–29.
9. Беренгартен М.Г., Витковская Р.Ф., Городилов А.А., Пушнов А.С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Насадочные скрубберы для контактного теплообмена. СПб.: ФГБУ ВПО «СПГУТД», 2014.
10. Хлестков Д.О., Краснобородько Д.А., Холоднов В.А. Компьютерное моделирование процесса периодической ректификации // Математические методы в технике и технологиях. 2016. № 9 (91). С. 125–127.
11. Андреев М.В., Скачков И.В., Бальчугов А.В., Коробочкин В.В. Моделирование процесса абсорбции аммиака и метиламинов водой на новой регулярной насадке // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326, № 6. С. 69–78.
12. Лаптева Е.А., Лаптев А.Г. Ячеечная модель тепломассопереноса в пленочных блоках оросителей градиент // Вестник Казанского технологического университета. 2015. № 11 (18). С. 181–185.
13. Borovinskaya E.S., Reschetilowski W.P., Kholodnov V.A., Veniaminova G.N., Mammitzsch L. Experimental Studies and Modeling of Liquid-Phase Alkylation of

Phenylacetonitrile in a Microstructured Reactor // Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University). 2013. T. 1. C. 146–149.

14. Komarova M.A., Menshutina N.V., Glebov M.B. The Method of Selection of Supercritical Agent for the Separation of Close Boiling Mixtures // 21st International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2014 and 17th Conference on Process Integration, Modeling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction, PRES 2014. 21. 2014. P. 2378–2379.

15. Komarova M.A., Glebov M.B., Khitrov N.V., Glebov V.B. Application of Phase Equilibrium Diagrams for Evaluation of Mixture Separation With Supercritical Separating Agent // Russian Journal of Applied Chemistry. 2014. T. 87. No. 8. C. 1085–1093.

16. Komissarov Y.A., Sang D.Q. Multicomponent Distillation Calculations using Computer Simulation Principles // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2014. Vol. 48. No. 3. P. 280–287.

17. Serafimov L., Frolkova A. Determination of Vapor-Liquid Equilibrium Diagrams of Multicomponent Systems // Chemical Papers. 2016. Vol. 70. No. 12. P. 1578–1589.

18. Jasem H. Alsuwaidi, Omar R. Al Hamdan, Hamad M.M.I. Natural Draft Cooling Tower Performance Evaluation // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2015. No. 4 (6). P. 1499–1512.

19. Kuzmenko I., Prokopets R. Experimental and Theoretical Investigation of Mass Transfer in a Cooling Tower // Energetika. 2014. No. 1 (60). P. 27–35.

20. Vias A.K., Thakur R. Experimental Study of the Performance of Cross Flow Regenerator in Liquid Desiccant Cooling System // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2014. No. 4 (9). P. 481–489.

21. Пат. № 137480 РФ, Насадка для массообменной колонны / А.Ф. Хайруллин, В.А. Кузнецов. № 2013125352; заявл. 31.05.2013; опубл. 20.02.2014.

22. Хайруллин А.Ф., Кузнецов В.А. Эффективность насадок для массообменного устройства // Нефтяное хозяйство. 2014. С. 116–119.

23. Хайруллин А.Ф. Унос жидкости с уголковой насадки с отбойными элементами // Экспозиция Нефть Газ. 2014. № 5. С. 71–72.

24. Хайруллин А.Ф., Кузнецов В.А. Динамическая удерживающая способность регулярной насадки // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2015. № 5. С. 103–106.

REFERENCES

1. Abdullin A.Z. *Razrabotka konstruksii i metod rascheta struinykh nasadok dlya massoobmennyykh protsessov: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development of Designs and Method for Calculating Jet Nozzles for Mass Transfer Processes: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU, 2003. [in Russian].

2. Fatkullin R.N. *Razrabotka dvutavrovoy nasadki dlya massoobmennyykh protsessov v sisteme gaz-zhidkost': diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development of an I-Beam Nozzle for Mass Transfer Processes in the Gas-Liquid System: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU, 2004. [in Russian].
3. Lisova N.S., Glebov M.B. Ochistka khloroform-syrtsa metodami rektifikatsii i khemorektifikatsii [Crude Chloroform Purification with Chemical Rectification Method]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii — Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 2017, Vol. 31, No. 1 (182), pp. 83–85. [in Russian].
4. Krivoruchko M.I., Glebov M.B. Issledovanie protsessa ochistki khloroform-syrtsa s ispol'zovaniem ionnoi zhidkosti v ekstraktsionnoi kolonne [Study of the Process of Purification of the Chloroform Crude with the Use of Ionic Liquid in an Extraction Column]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii — Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 2016, Vol. 30, No. 4 (173), pp. 36–38. [in Russian].
5. Masagutov D.F., Pushnov A.S., Kashapov N.F. Vliyanie geometricheskikh kharakteristik regul'yarnykh strukturirovannykh nasadok na gidravlichesкое soprotivleniye i effektivnost' protsessov teplo i massoobmena [Influence of the Geometric Characteristics of Regular Structured Nozzles on the Hydraulic Resistance and Efficiency of Heat and Mass Transfer Processes]. *Khimicheskaya tekhnologiya — Chemical Technology*, 2014, Vol. 15, No. 9b. [in Russian].
6. Lebedev A.E., Zaitsev A.I., Badoev V.A. Metod opredeleniya koeffitsienta otrazheniya chastits ot boynogo elementa [Method for Determining the Reflection Coefficient of Particles from the Breaker Element]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya — Modern Problems of Science and Education*, 2014, No. 6, pp. 340. [in Russian].
7. Komissarov Yu.A., Kiselev M.S. Komp'yuternoe modelirovanie parozhidkostnogo ravnovesiya [Computer Simulation of Vapor-Liquid Equilibrium]. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii sistemnykh issledovaniy. Informatika, ekologiya, ekonomika — Bulletin of the International Academy of System Studies. Computer Science, Ecology, Economics*, 2017, Vol. 19, No. 1, pp. 140–146. [in Russian].
8. Serafimov L.A., Chelyuskina T.V., Frolkova A.K. Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya khimicheskikh i massoobmennyykh protsessov [Features of Mathematical Modeling of Chemical and Mass Transfer Processes]. *Tonkie khimicheskije tekhnologii — Thin Chemical Technologies*, 2014, Vol. 9, No. 5, pp. 21–29. [in Russian].
9. Berengarten M.G., Vitkovskaya R.F., Gorodilov A.A., Pushnov A.S. *Protsessy i apparaty zashchity okruzhayushchei sredy. Nasadochnye skrubbery dlya kontaktnogo teploobmena* [Processes and Devices for Environmental Protection. Nozzle Scrubbers for Contact Heat Transfer]. Saint-Petersburg, FGBUVPO «SPGUTD», 2014. [in Russian].
10. Khlestkov D.O., Krasnoborod'ko D.A., Kholodnov V.A. Komp'yuternoe modelirovanie protsessa periodicheskoi rektifikatsii [Computer Simulation of the Process of Periodic Rectification]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh — Mathematical Methods in Engineering and Technology*, 2016, No. 9 (91), pp. 125–127. [in Russian].
11. Andreenko M.V., Skachkov I.V., Bal'chugov A.V., Korobochkin V.V. Modelirovanie protsessa absorptsii ammiaka i metilaminov vodoi na novoi regul'yarnoi nasadke [Modeling of Ammonia and Methylamine Absorption with Water on a New Regular Packing]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2015, Vol. 326, No. 6, pp. 69–78. [in Russian].
12. Lapteva E.A., Laptev A.G. Yachechnaya model' teplomassoperenosa v plenochnykh blokakh orositelei gradiren [Cell Model of Heat and Mass Transfer in Film Blocks of Cooling Tower Irrigators]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta Bulletin of Kazan Technological University*, 2015, No. 11 (18), pp. 181–185. [in Russian].
13. Borovinskaya E.S., Reschetilowski W.P., Kholodnov V.A., Veniaminova G.N., Mammitzsch L. Experimental Studies and Modeling of Liquid-Phase Alkylation of Phenylacetone in a Microstructured Reactor. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 2013, Vol. 1, pp. 146–149.
14. Komarova M.A., Menshutina N.V., Glebov M.B. The Method of Selection of Supercritical Agent for the Separation of Close Boiling Mixtures. *21st International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2014 and 17th Conference on Process Integration, Modeling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction, PRES 2014*. 21. 2014. P. 2378–2379.
15. Komarova M.A., Glebov M.B., Khitrov N.V., Glebov V.B. Application of Phase Equilibrium Diagrams for Evaluation of Mixture Separation With Supercritical Separating Agent. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2014, Vol. 87, No. 8, pp. 1085–1093.
16. Komissarov Y.A., Sang D.Q. Multicomponent Distillation Calculations using Computer Simulation Principles. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2014, Vol. 48, No. 3, pp. 280–287.
17. Serafimov L., Frolkova A. Determination of Vapor-Liquid Equilibrium Diagrams of Multicomponent Systems. *Chemical Papers*, 2016, Vol. 70, No. 12, pp. 1578–1589.
18. Jasem H. Alsuwaidi, Omar R. Al Hamdan, Hammad M.M.I. Natural Draft Cooling Tower Performance Evaluation. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2015, No. 4 (6), pp. 1499–1512.
19. Kuzmenko I., Prokopets R. Experimental and Theoretical Investigation of Mass Transfer in a Cooling Tower. *Energetika*, 2014, No. 1 (60), pp. 27–35.
20. Vias A.K., Thakur R. Experimental Study of the Performance of Cross Flow Regenerator in Liquid Desiccant Cooling System. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2014, No. 4 (9), pp. 481–489.
21. Khairullin A.F., Kuznetsov V.A. *Nasadka dlya massoobmennoi kolonny* [Nozzle for Mass Transfer Columns]. Patent RF, No. 137480, 2014. [in Russian].
22. Khairullin A.F., Kuznetsov V.A. Effektivnost' nasadok dlya massoobmennogo ustroystva [Efficiency Nozzles for Mass Transfer Devices]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 2014, pp. 116–119. [in Russian].
23. Khairullin A.F. Unos zhidkosti s ugolkovoi nasadki s otboynymi elementami [Carrying out Liquid from a Corner

Nozzle with Chipping Elements]. *Ekspozitsiya Neft' Gaz* — *Exposition Oil Gas*, 2014, No. 5, pp. 71-72. [in Russian].

24. Khairullin A.F., Kuznetsov V.A. Dinamicheskaya uderzhivayushchaya sposobnost' regul'yarnoi nasadki

[Dynamic Holding Capacity of a Regular Nozzle]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz*, 2015, No. 5, pp. 103–106. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Хайруллин Альмир Фанилович, аспирант, БашГУ, г. Уфа, Российская Федерация

Almir F. Khairullin, Post-graduate Student, Bashkir State University, Ufa, Russian Federation

e-mail: almirmig@mail.ru

Абдеев Эльдар Ринатович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», директор ООО МИП «ТМО», БашГУ, г. Уфа, Российская Федерация

Eldar R. Abdeev, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Technological Machines and Equipment Department, Director of MIP TMO LLC, Bashkir State University, Ufa, Russian Federation

Шарипов Марсель Ильгизович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», БашГУ, г. Уфа, Российская Федерация

Marsel I. Sharipov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Technological Machines and Equipment Department, Bashkir State University, Ufa, Russian Federation

Абдеев Ринат Газизьянович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», директор Учебно-научного центра инженерного факультета, БашГУ, г. Уфа, Российская Федерация

Rinat G. Abdeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Technological Machines and Equipment Department, Director of Educational and Scientific Center of Engineering Faculty, Bashkir State University, Ufa, Russian Federation

e-mail: arg@bgutmo.ru