

УДК 662.6.9

И. И. Пятаев¹, Л. Н. Москалев¹, В. С. Францкевич², Р. И. Ланкин²¹Казанский национальный исследовательский технологический университет (Российская Федерация)²Белорусский государственный технологический университет**СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНУТРЕННИХ УСТРОЙСТВ КОЛОННЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ НЕСТАБИЛЬНОГО БЕНЗИНА**

В данной статье рассматриваются конструктивные и технологические характеристики колонн стабилизации переработки нестабильного бензина, образующихся в процессе перегонки нефти. Основная цель исследования – сравнить эффективность внутренних устройств колонны и оценить различные конструкции и эксплуатационные характеристики колонн, используемых в процессе стабилизации углеводородов, что является актуальным вопросом для нефтеперерабатывающей промышленности. В статье также представлен сравнительный анализ эффективности различных типов внутренних устройств колонн стабилизации, применяемых в процессе переработки нестабильного бензина. Проанализированы как традиционные (насадочные и тарельчатые), так и современные конструкции, применяемые в нефтехимической промышленности, с акцентом на их конструктивные и технологические характеристики. Особое внимание уделено свойствам насадочных (регулярных и нерегулярных) и тарельчатых (с переливными устройствами и провальными) устройств, а также их влиянию на производительность и гидравлическое сопротивление колонн.

Отдельно рассматриваются устаревшие желобчатые тарелки, их недостатки (низкая эффективность, высокое гидравлическое сопротивление, склонность к засорению), а также причины их постепенного вытеснения более современными решениями. В заключение ставится задача модернизации колонн стабилизации бензина с учетом физико-химических свойств бензина, приводящих к снижению производительности ввиду образования отложений. Предлагается рассмотреть возможность применения клапанных тарелок для повышения эффективности процесса и снижения риска отложений, несмотря на риск прилипания клапанов.

Ключевые слова: колонна стабилизации, эффективность, внутренние устройства колонн, гидравлическое сопротивление, модернизация.

Для цитирования: Пятаев И. И., Москалев Л. Н., Францкевич В. С., Ланкин Р. И. Сравнение эффективности внутренних устройств колонны стабилизации при переработке нестабильного бензина // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2025. № 2 (295). С. 102–108. DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-13.

I. I. Pyataev¹, L. N. Moskaev¹, V. S. Frantskevich², R. I. Lankin²¹Kazan National Research Technological University (Russian Federation)²Belarusian State Technological University**COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF THE INTERNAL DEVICES OF THE STABILIZATION COLUMN IN PROCESSING UNSTABLE GASOLINE**

This article discusses the design and technological characteristics of stabilization columns for processing unstable gasoline formed during oil distillation. The main objective of the study is to compare the efficiency of column internals and evaluate various designs and performance characteristics of columns used in the hydrocarbon stabilization process, which is a topical issue for the oil refining industry. The article also presents a comparative analysis of the efficiency of various types of internals of stabilization columns used in the processing of unstable gasoline. Both traditional (packed and tray) and modern designs used in the petrochemical industry are considered, with an emphasis on their design and technological characteristics. Particular attention is paid to the analysis of packed (regular and irregular) and tray (with overflow devices and failure) devices, as well as their impact on the productivity and hydraulic resistance of the columns.

Separately, obsolete grooved trays, their disadvantages (low efficiency, high hydraulic resistance, tendency to clogging) and the reasons for their gradual displacement by more modern solutions are considered. In conclusion, the task of modernizing gasoline stabilization columns is set, taking into account the physical and chemical properties of gasoline, leading to a decrease in productivity due to the formation of deposits. It is proposed to consider the possibility of using valve trays to improve the efficiency of the process and reduce the risk of deposits, despite the risk of valve sticking.

Keywords: stabilization column, efficiency, column internals, hydraulic resistance, modernization.

For citation: Pyataev I. I., Moskalov L. N., Frantskevich V. S., Lankin R. I. Comparison of the efficiency of the internal devices of the stabilization column in processing unstable gasoline. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnology, Geoecology*, 2025, no. 2 (295), pp. 102–108 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-13.

Введение. В настоящее время существует значительное количество различных технологических тепломассообменных процессов. В химической и нефтехимической промышленности используется такой тип оборудования, как емкостный, а именно колонны. Основной задачей данных колонн является проведение в них процессов ректификации, абсорбции, адсорбции, деаэрации, экстракции и т. д.

В представленной публикации рассматриваются конструктивные и технологические характеристики колонн стабилизации переработки нестабильного бензина, образующихся в процессе перегонки нефти.

Основная часть. Традиционные технологические колонны стабилизации или ректификации конструктивно имеют различные виды внутренних устройств, которые отличаются в зависимости от проводимого технологического процесса. Конструкции внутренних элементов колонны классифицируют на насадочные и тарельчатые [1].

Насадочные устройства можно разделить на два типа: регулярные, нерегулярные. Регулярные – это хордовые, блочные, плоскопараллельные. Нерегулярные представляет собой россыпь мелких элементов, складывающихся в неупорядоченном виде и имеющих разнообразную геометрию [2]. Однако считается, что у регулярных насадок меньшее гидравлическое сопротивление при их правильной установке по сравнению с нерегулярными. Низкое гидравлическое сопротивление обеспечивает более высокую производительность колонн и установки в целом. Кроме того, их пропускная способность выше, чем у колонн с нерегулярной насадкой. Такие насадки чаще используют в вакуумных колоннах [3, 4]. Отличительными характеристиками насадок также являются производительность, эффективность, гидравлическое сопротивление и т. п. Данные характеристики и показатели представлены в табл. 1 [5].

Тарельчатые устройства [6]. Тарелки представляют собой металлические диски, которые могут иметь различные конструкции и принципы функционирования.

В настоящее время в промышленности контактные тарелки классифицируют следующим образом:

- 1) по способу передачи жидкости с тарелки на тарелку;
- 2) способу взаимодействия жидкой и паровой фаз;

- 3) характеру диспергирования взаимодействующих фаз.

Таблица 1

Сравнение контактных устройств

Параметр	Контактные устройства		
	регулярные насадки	нерегулярные насыпные насадки	прочие виды
Высота, эквивалентная теоретической тарелке, м	0,175–1,500 0,5–2,5*	0,35–0,45	0,2–0,3
Рабочая скорость по газовой фазе, м/с	0,20–8,00 0,4–1,2*	1,0–2,5	2,0–6,0
Диапазон рабочих плотностей орошения, м ³ /(м ² ·ч)	0,1–120 20–100*	20–40	20–100
Гидравлическое сопротивление, кПа/м	0,133–0,600 2,5–0,8*	1,0–2,0	0,75–2,00

*Насадка Mellapak.

По способу передачи жидкости различают тарелки со специальными переточными устройствами и тарелки провальные (рис. 1) [6].

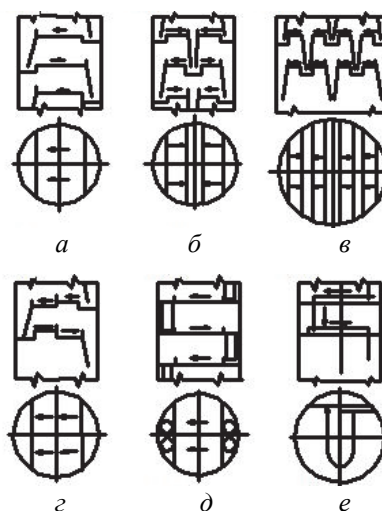


Рис. 1. Схемы организации движения потока жидкости на тарелках с переливными устройствами:

- а – однопоточная; б – двухпоточная;
в – четырехпоточная; г – каскадная;
д – с переливными трубами;

е – с кольцевым движением жидкости на тарелке

По способу взаимодействия жидкой и паровой фаз (рис. 2) тарелки делятся [7]:

- 1) на тарелки перекрестного тока (тарелки с переливными устройствами);
- 2) тарелки противотока (провальные тарелки);
- 3) перекрестно-прямоточные контактные устройства;
- 4) скоростные прямоточные тарелки.

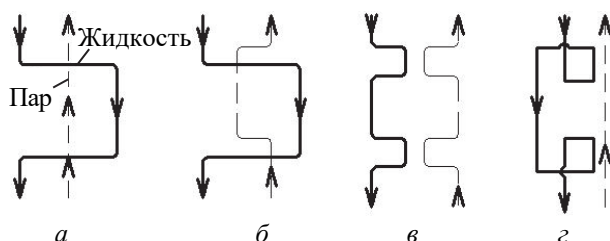


Рис. 2. Основные схемы движения пара и жидкости в контактной зоне тарелки: а – перекрестный ток; б – перекрестный прямоток; в – противоток; г – прямоток

По характеру диспергирования взаимодействующих фаз выделяют тарелки барботажного и струйного типов. На тарелках пар (газ), диспергируясь на мелкие пузырьки и струи, с большой скоростью проходит через слой жидкости [6].

Тарельчатые колонны имеют аналогичные с насадочными измеряемые характеристики и показатели, которые представлены в табл. 2 [8].

На некоторых предприятиях нашей страны до сих пор применяются желобчатые тарелки [9], несмотря на то, что они морально устарели и практически не выпускаются. На действующих предприятиях переработки нестабильного бензина такие конструкции встречаются все реже, и их использование значительно снижено, что объясняется развитием более эффективных и современных

технологий, таких как другие виды тарелок. В связи с этим желобчатые тарелки либо полностью исключаются из проектирования, либо модернизируются путем замены на более эффективные устройства.

Желобчатые тарелки обладают рядом достоинств, но также имеют много недостатков. Единственным их практическим преимуществом выступает относительно небольшое число желобов и колпачков, которые требуется устанавливать при монтажных и ремонтных работах. В остальном все показатели таких тарелок низкие, поэтому их повсеместно заменяют на более современные [10].

Эффективность указанных тарелок составляет 30–55%, при этом существует ряд недостатков таких внутренних устройств:

- их конструкция может приводить к образованию значительных гидравлических сопротивлений, что увеличивает потребление энергии на перекачку [3];

- ограниченная площадь контакта между фазами может снижать эффективность массопередачи, особенно при высоких нагрузках [6];

- желобчатые тарелки подвержены засорению, что требует регулярного обслуживания и очистки, увеличивая эксплуатационные затраты [6];

- конструкция данных тарелок может ограничивать диапазон рабочих условий, таких как температура и давление, что делает их менее универсальными по сравнению с другими типами тарелок [11];

- в условиях высоких скоростей потока возможно возникновение явления «пульсации», что также негативно сказывается на стабильности работы колонны [6].

Профили зависимости гидравлического сопротивления тарелки от скорости газа представлены на (рис. 3).

Таблица 2

Основные показатели тарелок

Тип тарелок	Относительная производительность	Относительная эффективность (при нагрузке, составляющей 85% от максимальной)	Устойчивость работы* при $H = 450-600$ мм и двух значениях L_v^{***} , м ³ /(мч)		Величина гидравлического сопротивления при оптимальной нагрузке, Па
			30–60	≤ 30	
Колпачковая	1	1	2	3,5	700–1000
S-образные элементы	1,0–1,1	1,0–1,1	2	2,5	700–100
Клапанная	1,2–1,5	1,0–1,1	3	4	500–800
Ситчатая**	1,2–1,4	1,0–1,1	2	3	300–400
Струйная	1,2	0,8	2	3	200–500
Ситчатая с отбойниками	1,4	0,8–0,9	2	3	100–300
Решетчатая провальная	1,2–1,4	0,75	1,5	1,8	300–400

*Отношение максимально и минимально допустимых нагрузок.

**Свободное сечение тарелки составляет не более 10%.

***Расход жидкости на единицу длины (метр) в час.

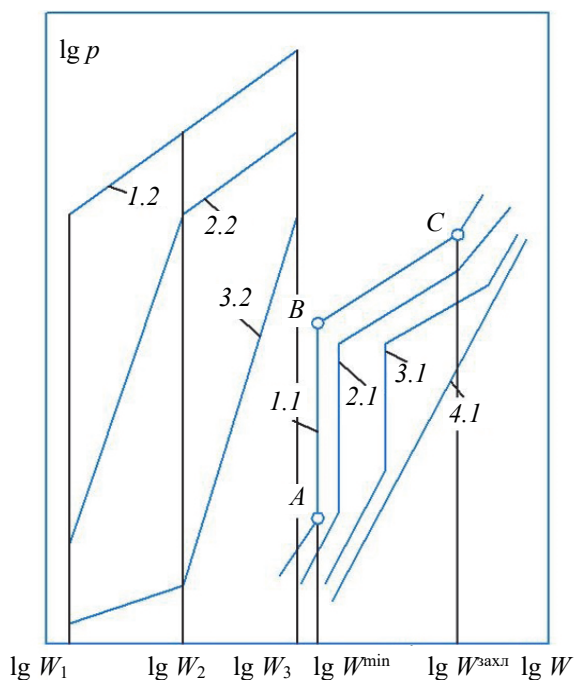


Рис. 3. Профили зависимости гидравлического сопротивления тарелок провального (желобчатого) и клапанного типов от скорости газа:

- 1.1 – при больших нагрузках по жидкости (желобчатая тарелка);
- 2.1 – при средних нагрузках по жидкости (желобчатая тарелка);
- 3.1 – при малых нагрузках жидкости (желобчатая тарелка);
- 4.1 – сухая тарелка (желобчатая тарелка);
- 1.2 – при орошении $L_v = 100$ л/ч (клапанная тарелка);
- 2.2 – при орошении $L_v = 300$ л/ч (клапанная тарелка);
- 3.3 – сухая тарелка $L_v = 0$ л/ч (клапанная тарелка)

Постановка задачи. На многих предприятиях переработки бензина в Российской Федерации в настоящее время используются как традиционные, так и современные внутренние устройства: клапанные тарелки или колпачковые тарелки с S-образными элементами. В связи с тем, что бензин имеет определенные физико-химические свойства, которые могут влиять на эффективность процессов, применение стандартных насадок может привести к снижению производительности из-за возможного образования отложений. Такие отложения, как правило, образуются вследствие накопления механических примесей, коррозионных продуктов или высокомолекулярных смолистых соединений, которые могут присутствовать в прямогонном или нестабильном бензине и осажаться на контактных элементах колонн в процессе стабилизации. При использовании высокоэффективных клапанных

тарелок также существует риск прилипания клапана к поверхности тарелки. Тем не менее в данной публикации рассматривается возможность модернизации колонн стабилизации прямогонного бензина за счет внедрения в колонну клапанных тарелок вместо желобчатых.

Таким образом, основной задачей исследования является модернизация существующей колонны с помощью внутренних устройств, которые будут значительно эффективнее, при этом будут отсутствовать следующие недостатки:

- ограниченная площадь контакта между фазами;
- образование значительных гидравлических сопротивлений;
- засорение желобчатых тарелок.

Математическое моделирование. Математическое моделирование эффективности работы колонн представлено в литературе [11]. Эффективность ступени (тарелок) известна как КПД Мерфри, зависящий от скорости массопереноса газового и жидкостного потоков. Существуют известные модели расчета КПД Мерфри с помощью различных моделей [11].

1. Модель идеального смешения для двух фаз (паровой и жидкостной).

2. Модель идеального смешения для жидкой фазы и модель идеального вытеснения для газовой.

3. Модель идеального вытеснения для жидкой фазы при перекрестном движении фаз.

4. Ячеечная модель для жидкой фазы при перекрестном движении фаз.

5. Диффузионная модель для жидкой фазы при перекрестном движении фаз.

6. Модель идеального вытеснения для обеих фаз при прямоточном движении.

7. Модель идеального вытеснения для двух фаз (паровой и жидкостной) при противоточном движении.

Особое влияние на работу колонн оказывает гидравлическое сопротивление, создаваемое внутренними устройствами. Гидравлическое сопротивление массообменного оборудования можно рассчитать по математической модели, представленной в литературном источнике [12, 13]. В целом при перемещении газа через колонну требуется значительное количество энергии, определяемой его гидравлическим сопротивлением. Оно равно гидравлическому сопротивлению единичной тарелки, умноженному на количество тарелок в колонне [14, 15].

На рис. 4 представлены результаты физических экспериментов, проведенных на кафедре «Машины и аппараты химических производств» Казанского научного исследовательского технологического университета.

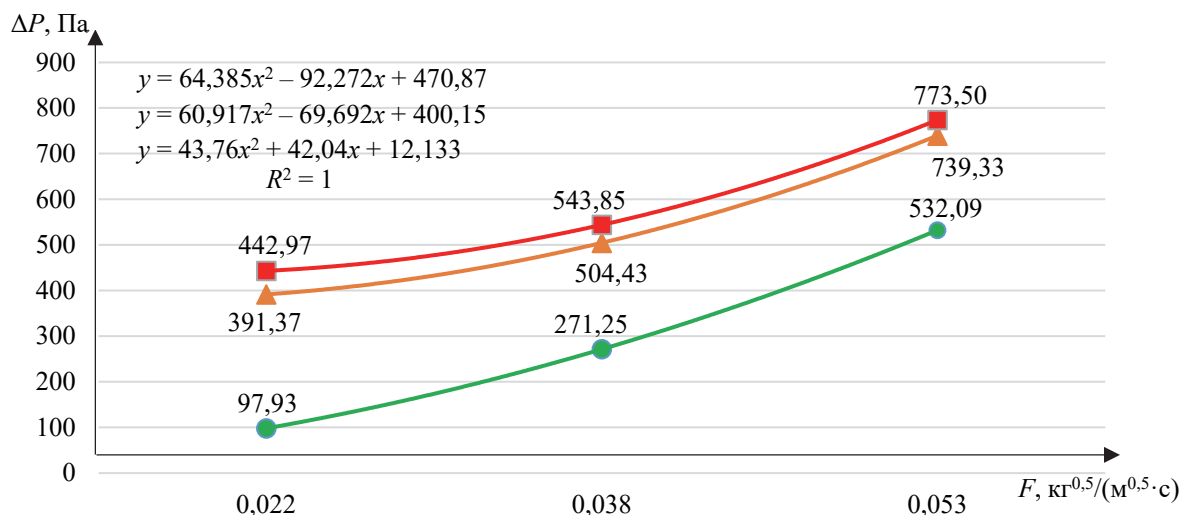


Рис. 4. Зависимость гидравлического сопротивления клапанной тарелки от нагрузки:

- — экспериментальные точки при орошении $L_v = 0 \text{ л/ч}$;
- ▲ — экспериментальные точки при орошении $L_v = 100 \text{ л/ч}$
- — экспериментальные точки при орошении $L_v = 300 \text{ л/ч}$
- линии — расчетные показатели

Эксперименты осуществлялись на экспериментальном стенде на системе «вода – воздух». Описание экспериментальной установки и методики расчетов гидравлических сопротивлений контактных внутренних устройств изложены в источнике [16].

Фактор газовой (паровой) нагрузки рассчитывался по формуле [16].

$$F = V(\rho_g)^{0,5},$$

где V — скорость движения газа в колонне, м/с; ρ_g — плотность газа (пара), кг/м³.

Заключение. Клапанные тарелки демонстрируют значительные преимущества перед желобчатыми в эффективности разделения фаз. Анализ зависимости гидравлического сопротивления от нагрузки (см. рис. 3, 4) показывает, что для клапанных тарелок характерно плавное увеличение гидравлического сопротивления при повышении нагрузки. Это позволяет поддерживать стабильность потока в определенном диапазоне нагрузок. В то же время, как видно из графиков зависимости гидравлического сопротивления от скорости газа для желобчатых тарелок (рис. 3), сопротивление резко возрастает даже при относительно небольшом увеличении скорости.

Анализ данных, представленных на рис. 3, свидетельствует, что клапанные тарелки создают большее сопротивление потоку газа, чем желобчатые, при идентичных скоростях. Следовательно, применение клапанных тарелок в процессе стабилизации бензина требует более детального изучения [17].

Выбор клапанных тарелок для модернизации колонн стабилизации бензина нуждается в тщательном анализе. Важно учитывать ряд факторов, таких как гидравлические характеристики, эффективность теплообмена, а также потенциальные проблемы (например, риск прилипания клапанов при различных условиях работы).

В процессе выбора внутренних устройств массообменного оборудования необходимо также обратить внимание на такие особенности процесса стабилизации, как состав сырья, температура и давление (они могут существенно влиять на технологический процесс).

Кроме того, стоит учитывать эксплуатационные условия и экономические показатели, включая стоимость установки и обслуживания выбранного типа устройства. Правильная оценка всех названных аспектов позволит выбрать оптимальное решение, подходящее для конкретных условий переработки нефти.

Список литературы

1. Банных О. П. Оборудование для нефтехимических производств. СПб.: ИТМО, 2014. 40 с.
2. Массообменные характеристики нерегулярной насадки инжехим / Д. А. Бурмистров [и др.] // Вестник КТУ, 2011. № 12. С. 74–76.
3. Расчет ректификационных колонн установок перегонки нефти / А. А. Гречухина [и др.]. Казань: Минобрнауки России, 2017. 92 с.

4. Ясавеев Х. Н., Лаптев А. Г., Фарахов М. И. Модернизация установок переработки углеводородных смесей. Казань: ФЭН, 2004. 307 с.
5. ПВН для интенсификации тепло- и массообменных колонных и других процессов химической и нефтехимической промышленности // Обзор – ИХТУ. Иваново; Пересвет, 2012. 18 с.
6. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии / А. И. Скобло [и др.]. М.: ООО «НедраБизнесцентр», 2000. 677 с.
7. Дахин О. Х. Массообменные колонные аппараты (конструкция, принцип работы, комплексный расчет, ремонт и монтаж). Волгоград: Политехник, 2011. 161 с.
8. Лаптев А. Г., Николаев Н. А., Башаров М. М. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов. М.: Теплотехник, 2011. 335 с.
9. Moodle. Аппаратурное и технологическое оформление процессов первичной переработки нефти и газа. URL: <https://moodle.kstu.ru/mod/resource/view.php?id=73931> (дата обращения: 23.03.2025).
10. Беляев В. М., Миронов В. М. Расчет и конструирование основного оборудования отрасли. Томск: ТПУ, 2009. 288 с.
11. Дытнерский В. П., Борисов Г. С., Брыков В. П. Основные процессы и аппараты химической технологии. 2-е изд. М.: Химия, 1991. 496 с.
12. Леканова Т. Л., Казакова Е. Г. Расчет абсорбционных установок. URL: https://xn--hlaftr.xn--plai/files/tig/ucheb_posob_kaf_tig_2010.pdf (дата обращения: 23.03.2025).
13. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. 7-е изд. М.: Гос. науч.-техн. изд-во хим. лит-ры, 1961. 830 с.
14. Бабицкий И. Ф., Вихман Г. Л., Вольфсон С. И. Расчет и конструирование аппаратуры нефтеперерабатывающих заводов. М.: НЕДРА, 1965. 904 с.
15. Броунштейн Б. И., Щеголев В. В. Гидродинамика, массо- и теплообмен в колонных аппаратах. Л.: Химия, 1988. 336 с.
16. Лабораторный практикум по курсу МАХП / В. В. Алексеев [и др.]. Казань: КНИТУ, 2011. 114 с.
17. Насадки регулярные стальных колонных аппаратов. Типы, параметры, конструкция и размеры: ОСТ 26-01-1029–86. Харьков: УкрНИИХиммаш, 1986. 31 с.

References

1. Bannykh O. P. *Oborudovaniye dlya neftekhimicheskikh proizvodstv* [Equipment for petrochemical production]. St. Petersburg, ITMO Publ., 2014. 40 p. (In Russian).
2. Burmistrov D. A., Farakhov M. M., Malygin A. V., Klinov A. V. Mass transfer characteristics of irregular packing in zhekhim. *Vestnik KTU* [Bulletin KTU], 2011, no. 12, pp. 74–76 (In Russian).
3. Grechukhina A. A., Elpidinsky A. A., Mingazov R. R., Plokhova S. E. *Raschet rektifikatsionnykh kolonn ustanovok peregonki nefii* [Calculation of distillation columns of oil distillation]. Kazan, Minobrnauki Rossii Publ., 2017. 92 p. (In Russian).
4. Yasaveev H. N., Laptev A. G., Farakhov M. I. *Modernizatsiya ustanovok pererabotki uglevodorodnykh smesey* [Modernization of hydrocarbon mixture processing units]. Kazan, FEN Publ., 2004. 307 p. (In Russian).
5. PVN for intensification of heat and mass transfer column and other processes of the chemical and petrochemical industry. *Obzor – IKhtU* [Review – IHTU]. Ivanovo; Peresvet, 2012. 18 p. (In Russian).
6. Skoblo A. I., Molokanov Yu. K., Vladimirov A. I., Shchelkunov V. A. *Protsessy i apparaty neftegazopererabotki i neftekhimii* [Processes and apparatuses of oil and gas refining and petrochemistry]. Moscow, ООО “NedraBiznestsentr” Publ., 2000. 677 p. (In Russian).
7. Dakhin O. Kh. *Massoobmennyye kolonnyye apparaty (konstruktsiya, printsip raboty, kompleksnyy raschet, remont i montazh)* [Mass transfer column apparatuses (design, operating principle, complex calculation, repair and installation)]. Volgograd, Politekhnik Publ., 2011. 161 p. (In Russian).
8. Laptev A. G., Nikolaev N. A., Basharov M. M. *Metody intensifikatsii i modelirovaniya teplomassoobmennyykh protsessov* [Methods of intensification and modeling of heat and mass transfer processes]. Moscow, Teplotekhnika Publ., 2011. 335 p. (In Russian).
9. Moodle. Hardware and technological design of primary oil and gas processing processes. Available at: <https://moodle.kstu.ru/mod/resource/view.php?id=73931> (accessed 23.03.2025) (In Russian).
10. Belyaev V. M., Mironov V. M. *Raschet i konstruirovaniye osnovnogo oborudovaniya otrasli* [Calculation and design of the main equipment of the industry]. Tomsk, TPU Publ., 2009. 288 p. (In Russian).
11. Dytnersky V. P., Borisov G. S., Brykov V. P. *Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Main processes and apparatuses of chemical engineering. 2nd ed.]. Moscow, Chemistry Publ., 1991. 496 p.

12. Lekanova T. L., Kazakova E. G., Calculation of absorption units. Available at: https://xn--hlafr.xn--plai/files/tig/ucheb_posob_kaf_tig_2010.pdf (accessed 23.03.2025) (In Russian).
13. Kasatkin A. G. *Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical engineering]. Moscow, Gossydarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatel'stvo khimicheskoy literatury Publ., 1961. 830 p. (In Russian).
14. Babitsky I. F., Vikhman G. L., Wolfson S. I. *Raschet i konstruirovaniye apparatury neftepererabatyvayushchikh zavodov* [Calculation and design of equipment for oil refineries]. Moscow, NEDRA Publ., 1965. 904 p. (In Russian).
15. Brounstein B. I., Shchegolev V. V. *Gidrodinamika, masso- i teploobmen v kolonnykh apparatakh* [Hydrodynamics, mass and heat transfer in column apparatuses]. Leningrad, Khimiya Publ., 1988. 336 p. (In Russian).
16. Alekseev V. V., Rachkovsky S. V., Gainullin M. G., Khomenko A. A. *Laboratornyy praktikum po kursu MAIP* [Laboratory workshop on the MAIP course]. Kazan, KNITU Publ., 2011. 114 p. (In Russian).
17. OST 26-01-1029-86. Regular packings for steel column apparatuses. Types, parameters, design and dimensions. Kharkov, UkrNIIkhim mash Publ., 1986. 31 p. (In Russian).

Информация об авторах

Пятаев Ильгам Ислямович – магистр кафедры «Машины и аппараты химических производств». Казанский национальный исследовательский технологический университет (ул. Карла Маркса, 68, 420015, г. Казань, Российская Федерация). E-mail: pyataev-2016@mail.ru

Москалев Леонид Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств». Казанский национальный исследовательский технологический университет (ул. Карла Маркса, 68, 420015, г. Казань, Российская Федерация). E-mail: MoskalevLN@corp.knrtu.ru

Францкевич Виталий Станиславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: fvs2@tut.by

Ланкин Роман Игоревич – ассистент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: roman1471@icloud.co

Information about the authors

Pyataev Ilgam Islyamovich – Master, the Department of Machines and Apparatus for Chemical Production. Kazan National Research Technological University (68 Karl Marx str., 420015, Kazan, Russian Federation). E-mail: pyataev-2016@mail.ru

Moskalev Leonid Nikolayevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Machines and Apparatus for Chemical Production. Kazan National Research Technological University (68 Karl Marx str., 420015, Kazan, Russian Federation). E-mail: MoskalevLN@corp.knrtu.ru

Frantskevich Vitaliy Stanislavovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fvs2@tut.by

Lankin Roman Igorevich – Assistant Lecturer, the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: roman1471@icloud.com

Поступила 30.05.2025