Оригинальная статья

Original Paper

УДК 662.749.33 К.А. Башмур✉, А.Н. Димов, В.В. Бухтояров, 2024

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,
660041, г. Красноярск, Россия
✉ e-mail: bashmur@bk.ru

UDC 662.749.33 © K.A. Bashmur✉, A.N. Dimov, V.V. Bukhtoyarov, 2024

Siberian Federal University, Krasnoyarsk,
660041, Russian Federation
✉ e-mail: bashmur@bk.ru

Турбинный геликоидный модуль смесителя для обеспечения качества технологического процесса предобработки каменноугольной смолы

Flow-driven Mixer with Helicoid Module for Quality Assurance of Coal Tar Pretreatment Process

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-12-20-24

БАШМУР К.А.
Старший преподаватель кафедры технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса, младший научный сотрудник лаборатории биотопливных композиций, аспирант ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия, e-mail: bashmur@bk.ru

ДИМОВ А.Н.
Аспирант ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия, e-mail: artem.dimov.1999@mail.ru

БУХТОЯРОВ В.В.
Канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией биотопливных композиций ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия, e-mail: vbukhtoyarov@sfu-kras.ru

Каменноугольная смола низкой и средней температуры (НСКС) является важным побочным продуктом карбонизации угля и содержит большое количество органических соединений с высокой добавленной стоимостью. Гетероатомы считаются одной из основных проблем, с которой сталкивается обработка НСКС при достижении высокой добавленной стоимости использования. Проточный смеситель является частью процесса предобработки НСКС в виде кислотной очистки для смешивания НСКС и добавок для удаления гетероатомов. Целью работы являлись разработка смесителя для условий предобработки НСКС и исследование его технологических возможностей в процессе гомогенизации системы «жидкость – жидкость». Представлен автономный смеситель, основной особенностью которого является наличие турбинного модуля, представляющего собой полую цилиндрическую камеру смешения с геликоидным рельефом поверхности. Процесс смешивания НСКС и добавок анализировался для нескольких вариантов смесителей посредством программного обеспечения для CFD-моделирования. Анализом коэффициента вариации и соответствующей эффективной длины смешивания смесителя было обнаружено, что эффект смешивания разработанной конструкции смесителя лучше, чем у используемого в данное время в процессе предобработки НСКС статического смесителя с перекрещивающимися под 90° пластинами. В частности, на 25% улучшена эффективная длина смешивания. Высококачественный процесс предобработки НСКС может быть получен в результате использования разработанного смесителя, что может сократить разрыв между фундаментальными исследованиями и промышленным производством, открыть путь для глубокой переработки НСКС.

** Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (номер FSRZ-024-0005).*

Ключевые слова: *интенсификация смешивания, каменноугольная смола, предварительная обработка, статический смеситель, численное моделирование, эффективная длина смешивания.*

Для цитирования: Башмур К.А., Димов А.Н., Бухтояров В.В. Турбинный геликоидный модуль смесителя для обеспечения качества технологического процесса предобработки каменноугольной смолы // Уголь. 2024;(12): 20-24. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-20-24.

Abstract

Low- and medium-temperature coal tar (LMCT) is an important by-product of coal carbonization and contains a large amount of organic compounds with high added value. Heteroatoms are considered one of the main problems faced by the processing of LMCT in achieving high added value of use. The flow mixer is part of the LMCT pretreatment process in the form of acid cleaning to mix the LMCT and heteroatom removal additives. The purpose of the work was to develop a mixer for pretreatment conditions of LMCT and to study its technological capabilities in the process of homogenization of the liquid-liquid system. An autonomous mixer is presented, the main feature of which is the presence of a turbine module, which is a hollow cylindrical mixing chamber with a helicoidal surface relief. The mixing process of LMCT and additives was analyzed for several mixer options using CFD modeling software. By calculating the coefficient of variation and the corresponding effective mixing length of the mixer, it was found that the mixing effect of the developed mixer design is better than SX static mixer currently used in the LMCT pretreatment process. The effective mixing length has been improved by 25%. A high-quality pretreatment process for LMCT can be obtained by using the developed mixer, which can bridge the gap between basic research and industrial production, offer a route for deep processing of LMCT.

Keywords

Mixing intensification, coal tar, pretreatment, static mixer, numerical simulation, effective mixing length.

Acknowledgements

This research was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FSRZ-024-0005).

For citation

Bashmur K.A., Dimov A.N., Bukhtoyarov V.V. Flow-driven Mixer with Helicoid Module for Quality Assurance of Coal Tar Pretreatment Process. *Ugol'*. 2024;(12):20-24. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-20-24.

ВВЕДЕНИЕ

В промышленных процессах помимо формирования основных полезных продуктов происходит образование вспомогательных, которые зачастую требуют иной глубины переработки для их преобразования в полезный продукт [1]. На уровне Правительства РФ утверждена научно-техническая программа[1], касающаяся необходимости разработки комплекса технологий для получения продуктов глубокой переработки угольного сырья и отходов. Учитывая, что в условиях иностранных санкций ограничен ввоз в РФ оборудования и комплектующих глубокой переработки энергоресурсов, актуальность отечественных разработок значительно возрастает. К тому же в условиях сокращения запасов сырой легкой нефти ведется поиск альтернативных источников энергии, и в настоящее время глубокая переработка энергоресурсов считается одним из способов преодоления глобальных энергетических кризисных ситуаций [2, 3]. Процесс глубокой переработки угля может обеспечить получение более 180 видов конечных продуктов с высокой добавленной стоимостью [4]. Таким образом, широта внедрения и качество процессов глубокой переработки угля являются актуальными научными и практическими задачами.

Годовой объем производства каменноугольной смолы в России существен и оценивается в 1,5 млн т [5]. Каменноугольная смола является известным и противоречивым вариантом жидкого топливного сырья [6]. Низко- и среднетемпературная каменноугольная смола (НСКС) представляет собой побочный продукт коксования угля и богата алканами, аренами и фенолами [7, 8]. По сравнению с высокотемпературной каменноугольной смолой НСКС имеет более высокое содержание алифатических углеводородов и низкую плотность (что также характерно и в сравнении с вакуумным остатком) [9]. При этом в сравнении с легкой нефтью НСКС имеет более высокие плотность, вязкость и более высокомолекулярные компоненты асфальтенов, снижающих текучесть смолы, вызывающих облитерацию трубопроводов, ухудшающих теплообмен и т.д., а также содержащиеся в ней гетероатомы неметаллов и металлы, такие как азот, сера, кислород, железо и кальций, которые трудно удалить, что значительно усложняет переработку НСКС в продукцию с высокой добавленной стоимостью [10, 11, 12]. Примеси в различных формах в НСКС серьезно угрожают установкам и катализаторам гидрирования, влияют на качество продукции и загрязнение окружающей среды, вызывая коррозию и старение оборудования и трубопроводов, снижение термоокислительной способности продуктов гидрирования, а также дезактивацию катализаторов [13]. Поэтому совершенствование технологий обработки НСКС имеет большое значение для ее практического использования.

В прошлом разработан ряд методов предварительной обработки каменноугольной смолы. Используются такие технологические процессы, как отстаивание, центрифугирование, экстракция, электролитическая диссоциация, кислотная очистка и др. Среди них метод предобработки кислотной очисткой достаточно прост, удобен и показывает высокую эффективность [14]. Технологическая установка кислотной очистки НСКС [15] состоит из питающей, смешивающей и разделяющих частей и может быть представлена следующей технологической схемой (*рис. 1*).

[1] *Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 № 1144-р. «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения».*

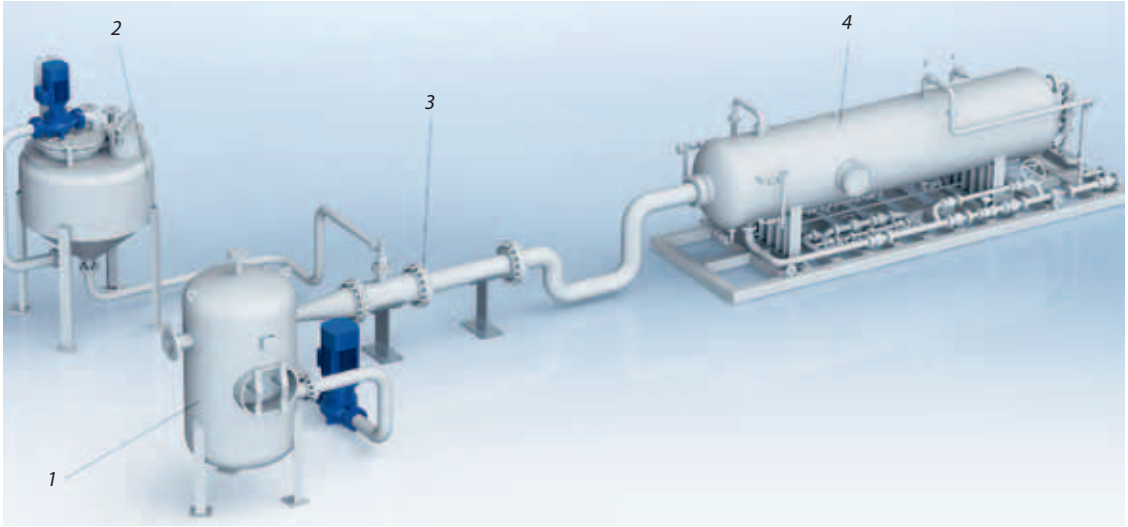

Рис. 1. Технологическая схема предобработки каменноугольной смолы:
1 – резервуар для хранения каменноугольной смолы; 2 – резервуар для хранения кислоты;
3 – поточный смеситель; 4 – трехфазный сепаратор

Fig. 1. Technological diagram of coal tar pretreatment: 1 – coal tar storage tank; 2 – acid storage tank;
3 – in-line mixer; 4 – three-phase separator

Стоит отметить, что технологическая установка кислотной очистки НСКС не содержит номенклатуру машин и оборудования, не выпускаемых отечественным машиностроением. В питающей части нагретая НСКС и перемешанная добавка с определенным массовым соотношением подаются в смешивающую часть. Смешивающая часть установки отвечает за стадию удаления гетероатомов, которая осуществляется посредством смесителя (СМ). Последняя стадия представляет собой разделение фаз «вода – легкая нефтяная фракция – тяжелая нефтяная фракция» и осуществляется в трехфазном сепараторе. Следовательно, СМ является важным элементом кислотной предобработки НСКС, так как равномерность и стабильность смешивания напрямую влияют на экономию сырья и эффективность удаления гетероатомов, и, соответственно, на последующую глубокую переработку/утилизацию НСКС.

Статические СМ нашли место в непрерывных технологических процессах обрабатывающей промышленности и, в отличие от приводных аналогов, требуют меньшего энергопотребления и имеют низкие затраты на техническое обслуживание [16]. Однако статические СМ могут иметь низкий КПД использования энергии потока для некоторых приложений, существенное перекрытие живого сечения, влекущее увеличение гидравлических сопротивлений, т.е. потерю напора, и ограничение функциональных возможностей в использовании СМ [17]. Последнее особенно актуально для процессов предобработки НСКС ввиду высокой вероятности зарождения центров кристаллизации смолисто-асфальтеновых отложений на статичных элементах СМ, последующей облитерации живого сечения СМ и нарушения технологического режима предобработки НСКС. Таким образом, для таких специфических условий требуется СМ, лишенный вышеописанных недостатков. В соответствии с вышесказанным, целью работы является исследование технологических возможностей нового типа смесителя технологической установки предобработки каменноугольной смолы относительно процесса гомогенизации системы «жидкость – жидкость».

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

На основе гидрокинетической турбины (патенты РФ на изобретения № 2695735 и № 2781027) разработана автономная динамическая компоновка СМ (*рис. 2*), особенностью которой является турбинный модуль – полая цилиндрическая камера смешения с геликоидным рельефом поверхности.

В отличие от статических СМ, в турбинном СМ элементы взаимодействия с потоком расположены на периферии, т.е. на внутренней поверхности камеры смешения. Благодаря этому, во-первых, сохраняется необходимая для перемешивания мощность (энергия) потока, являющаяся произведением перепада давления и объемного расхода, так как при этом рабочий объем будет больше, а гидравлические сопротивления меньше. Во-вторых, энергия потока расходуется не на его торможение, а на вращение камеры смешения с геликоидным рельефом, т.е. на тангенциальную и радиальную переориентацию направлений потока, что является основой эффективного процесса смешивания. В-третьих, синергетический эффект вращения камеры с потоком увеличивает центробежные и гравитационные силы в последнем. В-четвертых, выпадение парафинистых отложений во вращающемся оборудовании редуцируется, что объясняется комплексом факторов, представленных в [18].

Ввиду невозможности одновременного обеспечения динамического и геометрического подобий, а также существенных временных и материальных затрат проведение лабораторных экспериментов для исследования стратифицированных вращающихся потоков ограничено. Для анализа эффективности СМ были применены чис-

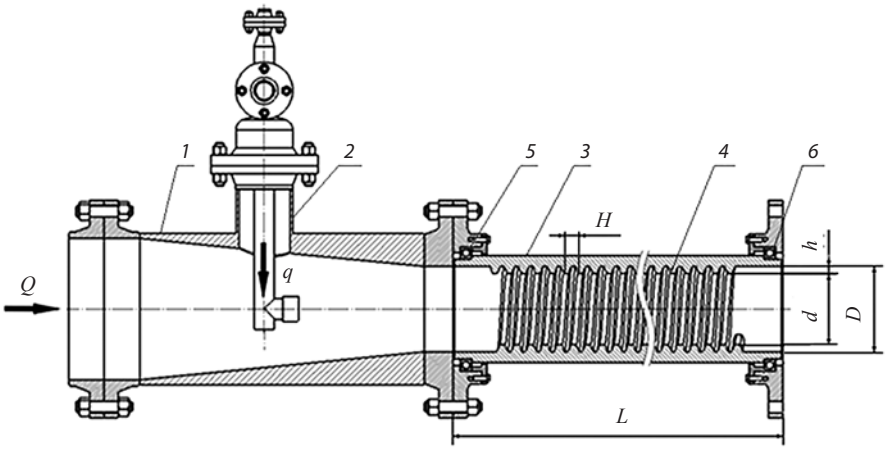

Рис. 2. Динамическая компоновка смесителя: 1 – камера впуска смолы; 2 – устройство ввода кислоты; 3 – турбинный геликоидный модуль (камера смешения); 4 – рельеф; 5, 6 – подшипники

Fig. 2. Flow-driven mixer design: 1 – coal tar inlet; 2 – acid inlet; 3 – turbine helicoid module (mixing chamber); 4 – relief; 5, 6 – bearings

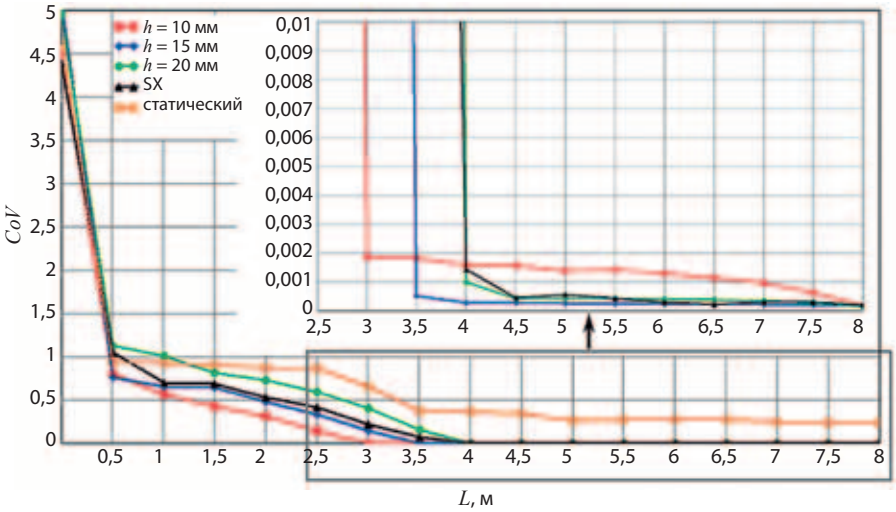

Рис. 3. Изменение коэффициента вариации в зависимости от длины смесителя

Fig. 3. Variation of coefficient of variance (CoV) with mixer length

ленные методы решения задач смешивания с использованием вычислительной гидродинамики (CFD). На текущий момент CFD широко применяется в области моделирования СМ и особенно привлекательна с точки зрения оптимизации. Немаловажным фактором является возможность наглядной демонстрации и получения точных значений исследуемых параметров потоков в любой вычисляемой точке. CFD-моделирование осуществлялось в среде ANSYS CFX и основывалось на решении определяющих уравнений потока среды. В качестве модели турбулентности, используемой при расчетах, была задана модель переноса сдвиговых напряжений k-ω SST. Данная модель последовательно изменяется от стандартной k-ω для внутреннего течения в пограничном слое до высокорейнольдсовой k-ε модели для внешней области, а также содержит модифицированную формулу турбулентной вязкости для учета эффектов переноса главного турбулентного сдвигового напряжения. Следовательно, модель k-ω SST содержит сильные стороны обеих вышеописанных моделей.

Задан расход НСКС на входе Q = = 28 м³/ч (Re = 360 при D = 73 мм), а также вторая фаза – добавка, расход которой на входе q = 0,1 м³/ч (Re = 30).

Эффективность СМ определялась коэффициентом вариации (CoV):

$$CoV = \frac{s}{c},$$

где s – стандартное отклонение доли добавок в поперечном сечении; c – усредненное значение объемной доли добавок в поперечном сечении. Показатели s и c рассчитываются на основе ANSYS CFX. Нулевое значение CoV указывает на идеальное смешивание. В типичном промышленном процессе добавка считается нормально смешанной при 1% CoV. Определялась эффективная длина смешивания смесителя L_{EML}, соответствующая CoV = 0,01.

Произведено сравнение для статической компоновки СМ с винтовым рельефом, статического SX-смесителя с перекрещивающимися под 90° пластинами и лучшими результатами смешения согласно [15], а также разработанной динамической компоновки СМ с различной высотой рельефа h (*рис. 2*). Результаты моделирования представлены на *рис. 3*.

Сравнение динамической компоновки СМ с SX-смесителем показывает, что выигрыш в эффективной длине смешивания L_{EML} разработанной конструкции составляет до 25% ($L_{EML} \approx 3$ и 4 м соответственно) в зависимости от конфигурации и означает более раннюю гомогенизацию потока. С уменьшением высоты винтового рельефа h на 5 мм длина L_{EML} пропорционально уменьшается на 0,5 м, т.е. интенсифицируется процесс перемешивания. Данный эффект возникает вследствие того, что с уменьшением h интенсивнее вовлекаются слои жидкости из центральной области в периферийную, где поток приобретает окружную скорость. Также это говорит о необходимости оптимизационных исследований параметров СМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для условий технологии предобработки низко- и среднетемпературной каменноугольной смолы (НСКС) разработан автономный смеситель (СМ), основной особенностью которого является наличие турбинного модуля, представляющего собой полую цилиндрическую камеру смешения с геликоидным рельефом поверхности.

Выполнено трехмерное CFD-моделирование смешивания несжимаемых жидкостей для SX-смесителя и разработанной динамической компоновки СМ с различной высотой рельефа. Эффективность СМ определялась анализом

коэффициента вариации и соответствующей эффективной длины смешивания в двухфазной системе НСКС-добавка. Получено 25%-ное преимущество в эффективной длине смешивания разработанного СМ с геликоидным модулем над SX-смесителем. Для дальнейшего улучшения показателей смешивания необходимы оптимизационные параметрические исследования СМ.

Разработка СМ с геликоидным модулем качественно расширяет технологические возможности процесса предобработки НСКС, позволит повысить его производительность, обеспечит экономию металлоемкости и преимущество в эргономике.

Список литературы • References

1. Kolenchukov O.A., Bashmur K.A., Kurashkin S.O. et al. Numerical and experimental study of heat transfer in pyrolysis reactor heat exchange channels with different hemispherical protrusion geometries. Energies. 2023;16(16):6086. DOI: 10.3390/en16166086.
2. Zhu Y., Li G., Yang T. et al. Tracing the composition and structure evolution of oxygen-enriched asphaltenes during the hydrotreating of middle-low temperature coal tar. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2022;168:105780. DOI: 10.1016/j.jaap.2022.105780.
3. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V. et al. Circular mining wastes management for sustainable production of Camellia sinensis (L.) O. Kuntze. Sustainability. 2023;15(15):11671. DOI: 10.3390/su151511671.
4. Факторы конкурентоспособности углехимической отрасли России в условиях глобальной трансформации мировой энергетики / Л.Н. Щербакова, Е.К. Евдокимова, А.О. Рада и др. // Уголь. 2022. № 6. С. 48-53. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-48-53.
   Shcherbakova L.N., Evdokimova E.K., Rada A.O., Nikitina O.I. Competitive factors of the Russian coal-chemical industry in the global transformation of the global energy sector. *Ugol'*. 2022;(6):48-53. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-48-53.
5. Kozlov A.P., Cherkasova T.G., Frolov S.V. et al. Innovative coal-tar products at PAO Koks. Coke and Chemistry. 2020;63:344-350. DOI: 10.3103/S1068364X20070054.
6. Исламов С.Р. Глубокая переработка угля: критический анализ технологий // Уголь. 2024. № 6. С. 32-39. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-32-39.
   Islamov S.R. Deep coal processing: a critical analysis of technologies. *Ugol'*. 2024;(6):32-39. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-32-39.
7. Li J.-H., Wei X.-Y., Yang Z. et al. Selective catalytic hydroconversion of a low-temperature coal tar-derived crude phenols to cyclohexanol over a nitrogen-doped Co-based catalyst. Fuel Processing Technology. 2023;239:107535. DOI: 10.1016/j.fuproc.2022.107535.
8. Методологические подходы к организации и оценке системы обращения с отходами угледобывающего производства / И.В. Петров, И.А. Меркулина, Т.В. Харитонова и др. // Уголь. 2020. № 9. С. 59-64. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-9-59-64.
   Petrov I.V., Merkulina I.A., Haritonova T.V., Kolesnik G.V. Methodological approaches to organization and assessment of coal mine waste management system. *Ugol'*. 2020;(9):59-64. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-9-59-64.
9. Sun Z., Zhang W. Chemical composition and structure characterization of distillation residues of middle-temperature coal tar. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2017;25(6):815-820. DOI: 10.1016/j.cjche.2016.12.007.
10. Zhang X.-Q., Kang Y.-H., Gao J. et al. Effective hydroconversion of heteroatom-containing organic species from the extraction of low-temperature coal tar to cycloalkanes over a Y/Beta composite zeolite supported nickel nanoparticles. Fuel. 2022;321:124062. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124062.
11. Du C., Li D., Shi C. et al. Study on the association driving force of low temperature coal tar asphaltenes. Journal of Molecular Structure. 2022;1254:132361. DOI: 10.1016/j.molstruc.2022.132361.
12. Liu J., Ahmad F., Zhang Q. et al. Interactive tools to assist convenient group-type identification and comparison of low-temperature coal tar using GC×GC–MS. Fuel. 2020;278:118314. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118314.
13. Fan X., Li D., Cui L. et al. Analysis of distribution and structures of heteroatom compounds in asphaltene of medium/low temperature coal tar by negative anion mode ESI FT-ICR MS. Sustainability. 2022;14(23):15497. DOI: 10.3390/su142315497.
14. Liu J., Zhu Y., Miao Z. et al. Study on the pretreatment process and removal rules of sulfur-containing compounds for medium- and low-temperature coal tar. ACS Omega. 2021;6(19):12541-12550. DOI: 10.1021/acsomega.1c00355.
15. Wang Y., Li D., Zhu Y. et al. Simulation and selection of static mixer, the core equipment of middle-low temperature coal tar pretreatment, based on the computational fluid dynamics. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2022;173:108816. DOI: 10.1016/j.cep.2022.108816.
16. Valdés J.P., Kahouadji L., Matar O.K. Current advances in liquid–liquid mixing in static mixers: A review. Chemical Engineering Research and Design. 2022;177:694-731. DOI: 10.1016/j.cherd.2021.11.016.
17. Ghanem A., Lemenand T., Valle D.D., Peerhossaini H. Static mixers: Mechanisms, applications, and characterization methods – A review. Chemical Engineering Research and Design. 2014;92(2):205-228. DOI: 10.1016/j.cherd.2013.07.013.
18. Yaghy G., Ali A., Charpentier T.V.J. et al. Wax deposition using a cold rotating finger: An empirical and theoretical assessment in thermally driven and sloughing regimes. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021;200:108252. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108252.

Authors Information

Bashmur K.A. – Senior Lecturer of the Department of Technological Machines and Equipment, Junior Researcher of the Laboratory of Biofuel Compositions, Postgraduate Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: bashmur@bk.ru

Dimov A.N. – Postgraduate Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: artem.dimov.1999@mail.ru

Bukhtoyarov V.V. – Phd (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory of Biofuel Compositions, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: vbukhtoyarov@sfu-kras.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.08.2024
Поступила после рецензирования: 15.11.2024
Принята к публикации: 28.11.2024

Paper info

Received August 12, 2024
Reviewed November 15, 2024
Accepted November 28, 2024