

О. С. Дмитриева, А. В. Дмитриев, Н. Ф. Сахибгареев**АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СЕПАРАЦИОННОЙ ЗОНЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕСС РАЗДЕЛЕНИЯ ЭМУЛЬСИЙ В МУЛЬТИВИХРЕВЫХ СЕПАРАТОРАХ***Ключевые слова:* эмульсия, сепарационная зона, закрученные течения, граница раздела фаз, разделение фаз.

Разделение эмульсий остается актуальной задачей в промышленности, требующей инновационных решений для повышения эффективности и надежности процессов. Разделение эмульсий в центробежном поле, в частности, является перспективным методом благодаря своей эффективности и способности обрабатывать большие объемы эмульсий за короткое время. Целью настоящего исследования является определение конструктивных размеров сепарационной зоны для эффективного отвода фаз в процессе разделения эмульсии мультивихревым сепаратором. Исследования сосредоточены на оптимизации конструкции устройств и оценке его эксплуатационной способности. В этом контексте описывается трехмерная модель вертикального сепаратора, который использует межтрубное пространство для разделения эмульсий. Эмульсия поступает через входной патрубок с прямоугольными отверстиями, создавая вихри в межтрубном пространстве. Эти вихри способствуют разделению фаз: тяжелая фаза отводится вверх, а легкая – вниз. Важным аспектом является определение геометрических параметров сепаратора, таких как диаметр отверстий для отвода фаз. Получены зависимости для определения диаметра отверстия в днище сепарационной зоны и в его верхней части с учетом скорости поступления и концентрации эмульсии в межтрубное пространство. При увеличении концентрации легкой фазы в составе эмульсии наблюдается уменьшение размера отверстия, требуемого для изготовления в днище сепарационной зоны межтрубного пространства мультивихревого сепаратора. Результаты исследований демонстрируют, что изменение массовой доли легкой фазы в эмульсии в диапазоне 0,15–0,25, не сказывается на изменении значений радиуса $r(H)$ при скорости поступающего потока в сепарационную зону 10 м/с. С увеличением высоты сепарационной зоны вследствие отклонения оси вихря в межтрубном пространстве от прямой линии необходимо ограничить ее путем введения предельной зоны исполнения. Ожидается, что полученные результаты будут способствовать развитию технологии разделения в центробежном поле на нефтяных месторождениях и повышению экономического эффекта от внедрения мультивихревого сепаратора.

O. S. Dmitrieva, A. V. Dmitriev, N. F. Sahibgarееv**ANALYSIS OF SEPARATION ZONE PARAMETERS AND THEIR INFLUENCE ON THE EMULSION SEPARATION PROCESS IN MULTIVORTEX SEPARATORS***Keywords:* emulsion, separation zone, swirling flows, phase boundary, phase separation.

The separation of emulsions remains a relevant task in the industry, requiring innovative solutions to enhance the efficiency and reliability of processes. In particular, the separation of emulsions in a centrifugal field is a promising method due to its efficiency and ability to process large volumes of emulsions in a short time. The aim of the present study is to determine the structural dimensions of the separation zone for the effective removal of phases in the process of emulsion separation using a multi-vortex separator. The research focuses on optimizing the design of the devices and evaluating their operational capability. In this context, a three-dimensional model of a vertical separator is described, which uses the inter-tube space for emulsion separation. The emulsion enters through an inlet nozzle with rectangular openings, creating vortices in the inter-tube space. These vortices facilitate phase separation: the heavy phase is discharged upwards, and the light phase downwards. An important aspect is the determination of the geometric parameters of the separator, such as the diameter of the openings for phase discharge. Dependencies for determining the diameter of the opening in the bottom of the separation zone and in its upper part, considering the flow rate and concentration of the emulsion in the inter-tube space, have been obtained. As the concentration of the light phase in the emulsion increases, the size of the opening required in the bottom of the separation zone of the inter-tube space of the multi-vortex separator decreases. The research results demonstrate that changing the mass fraction of the light phase in the emulsion within the range of 0.15–0.25 does not affect the change in the values of the radius $r(H)$ at a flow velocity into the separation zone of 10 m/s. With an increase in the height of the separation zone due to the deviation of the vortex axis in the inter-tube space from a straight line, it is necessary to limit it by introducing a boundary zone of execution. It is expected that the obtained results will contribute to the development of centrifugal field separation technology in oil fields and increase the economic effect of implementing a multi-vortex separator.

Эмульсии и двухфазные потоки жидкость–жидкость присутствуют почти во всех технических и промышленных процессах. Они легко образуются во время добычи, хранения, транспортировки и переработки сырой нефти [1, 2]. Их присутствие вызывает значительные трудности при последующей обработке сырой нефти – сокращают срок службы оборудования из-за коррозии, а маслянистые сточные воды могут загрязнять окружающую среду [3, 4].

Эмульсия должна быть разделена на две фазы перед транспортировкой и процессом переработки и соответствовать определенному стандарту остаточной воды и соли, в то время как содержание воды должно быть менее 1% [5]. Поэтому процесс разделения имеет важное значение в нефтехимической промышленности. При этом в настоящее время обычно используются методы гравитационного и центробежного разделения, электрокоагуляция, химические, мембранные и другие [6–9]. Все они

имеют недостатки, связанные с высокой стоимостью и низкой эффективностью, особенно, если эмульсии содержат поверхностно-активные вещества.

Технология мембранной фильтрации как потенциальный метод разделения водонефтяных смесей вызвала значительный интерес и широко исследовалась благодаря своим многочисленным преимуществам, включая простоту, высокую эффективность, низкое энергопотребление. Несмотря на это, существуют определенные проблемы, возникающие в процессе эксплуатации – загрязнение мембраны, приводящее к серьезному снижению пропускной способности, высокая стоимость мембраны и низкая скорость фильтрации, что препятствует широкому внедрению мембранной фильтрации в технологические схемы для разделения эмульсий. Для ускорения разделения фаз в относительно стабильных эмульсиях (например, концентрированных или тонких) обычно используют центробежные силы – это один из наиболее перспективных методов разделения эмульсий благодаря своей высокой эффективности, компактности и универсальности. Центробежные силы значительно ускоряют процесс разделения, что позволяет обрабатывать большие объемы эмульсии за короткое время [10–12]. Большинство исследований сосредоточены на оптимизации конструкции структур устройств и оценке эффективности разделения [11–14]. Таким образом, высокоэффективное обращение с эмульсиями стало актуальной и сложной проблемой в промышленности и научных кругах.

Авторами статьи разработана конструкция мультивихревого сепаратора [15], в котором разделение эмульсии осуществляется в вихрях, контактирующих друг с другом в межтрубном пространстве цилиндрического резервуара. Сепаратор, включающий в себя цилиндрический корпус, входной патрубок для подачи исходной водонефтяной эмульсии, прямоугольные отверстия, отличается от аналогичных устройств тем, что главной зоной разделения эмульсии является межтрубное пространство устройства (рис. 1).

Для проведения исследований построена трехмерная модель сепаратора вертикального типа со следующими геометрическими параметрами: внутренний диаметр внутренней трубы – 30 мм; наружный диаметр внутренней трубы – 31 мм; внутренний диаметр наружной трубы – 40 мм; внешний диаметр наружной трубы – 50 мм; высота внутренней трубы – 92 мм; количество прямоугольных щелей – 12; диаметр завихрения – 9 мм; высота прямоугольной щели – 10 мм. Значение внешнего диаметра наружной трубы изменялась в диапазоне от 20 до 80 мм.

Эмульсия поступает в устройство через входной патрубок, представляющий собой трубу круглого сечения в которой выполнены прямоугольные отверстия, расположенные чуть ниже середины высоты устройства, равномерно по окружности. Эти прямоугольные отверстия направляют поток эмульсии в межтрубное пространство (сепарационную зону), таким образом, что в нем образуются вихри, направление вращения которых противоположно друг

другу. При этом образуются устойчивые вихри малого диаметра в межтрубном пространстве, образованном двумя цилиндрическими трубами разной высоты, количество которых в два раза больше количества прямоугольных прорезей. При изменении направления потока эмульсии создается центробежная сила, за счет которой компоненты тяжелой фазы эмульсии отбрасываются на периферию, и начинает подниматься вверх под действием силы Архимеда. Далее тяжелая фаза отводится из сепаратора через верх сепарационной зоны, через выполненные отверстия. Легкая фаза направляется вниз, т.к. за счет действия центробежной силы компоненты эмульсии с меньшей плотностью оказываются в центре и отводятся из сепарационной зоны через отверстия в днище.

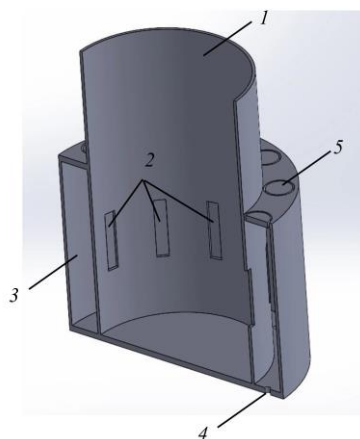


Рис. 1 – Вид мультивихревого сепаратора для разделения эмульсии в межтрубном пространстве: 1 –входной патрубок для подачи исходной водонефтяной эмульсии, 2 – прямоугольные отверстия, 3 – сепарационная зона, 4 – отверстия для отвода легкой фазы, 5 – отверстия для отвода тяжелой фазы

Fig. 1 – View of a multivortex separator for emulsion separation in the inter-tube space: 1 –inlet pipe for the supply of the initial water–oil emulsion, 2 – rectangular holes, 3 – separation zone, 4 – holes for the discharge of the light phase, 5 – holes for the discharge of the heavy phase

В процессе анализа особенностей построения сепаратора, а именно высоты внешней цилиндрической трубы сепаратора и ширины прямоугольных отверстий в трубе внутренней, ключевое значение имеет также определение диаметра отверстий, через которые осуществляется отвод фаз. Целью настоящего исследования является определение конструктивных размеров сепарационной зоны для эффективного отвода фаз в процессе разделения эмульсии мультивихревым сепаратором.

Рассмотрим межтрубное пространство мультивихревого сепаратора, в котором происходит разделение, в качестве допущения считаем, что в вертикальном цилиндре, ограниченном сверху и снизу плоскими поверхностями, вращается эмульсия, при вращении образуется воронка. Если вращение достаточно быстрое, воронка достигает дна. Следовательно, зная профиль границы раздела фаз,

можно определить диаметр, по которому воронка из легкой фазы будет контактировать с нижней плоскостью, таким образом, выполнив отверстие в нижней плоскости, равному этому диаметру, возможно организовать отвод из устройства непосредственно для легкой фазы. На краю цилиндра высотой H задана тангенциальная скорость W_{sl} , диаметр цилиндра d_v . В верхней части вертикального цилиндра организовано отверстие в виде кольца, внешний диаметр которого равен диаметру вихря в межтрубном пространстве мультивихревого сепаратора, через которое будет организован вывод тяжелой фазы (рис. 2). Таким образом, по профилю вихря в межтрубном пространстве мультивихревого сепаратора можно определить геометрические размеры отверстия снизу и кольцевую щель сверху. Внутренний диаметр определяется исходя из границы раздела фаз на верхней плоскости.

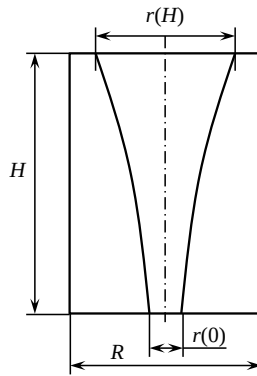


Рис. 2 – Схематичное изображение образовавшейся воронки внутри вихря в межтрубном пространстве сепаратора

Fig. 2 – Schematic representation of the formed vortex funnel in the inter-tube space of the separator

Для решения задачи осесимметричного стационарного движения эмульсии в вертикальном цилиндре с учетом линейного вихревого распределения скорости, необходимо рассмотреть баланс сил, действующих на частицы легкой и тяжелой фаз. Учитывая, что легкая фаза перемещается к оси цилиндра, а тяжелая фаза – к периферии, можно определить зависимость радиуса границы раздела $r(z)$ от продольной координаты z .

Основные допущения: движение стационарное и осесимметричное. Линейное вихревое распределение тангенциальной скорости $U\varphi(r) = W_{sl}r/R$, где $R = d_v/2$ – радиус цилиндра, $W_{sl} = W_{in} \frac{S_{in}}{S_{sl}}$ – тангенциальная

скорость на краю цилиндра, м/с, S_{in} – площадь входной трубы сепаратора, м²; S_{sl} – площадь прямоугольных щелей во внутреннем цилиндре, м². Плотности легкой и тяжелой фаз постоянны, их объемы не меняются. Массовая доля легкой фазы в эмульсии c_x известна и постоянна по объему. Тогда с учетом общего объема цилиндра $V = \pi R^2 H$ имеем, что объем легкой фазы составляет $V_o = c_x \pi R^2 H$, а объем тяжелой фазы –

$V_o = (1 - c_x) \pi R^2 H$. Гидростатическое давление учитывается.

Таким образом, уравнение баланса сил центробежной и тяжести на границе раздела фаз запишется в виде

$$(\rho_w - \rho_o) \frac{U_\varphi^2(r)}{r} = (\rho_w - \rho_o) g \frac{dz}{dr} \quad (1)$$

Упростив выражение, с учетом $U\varphi(r) = W_{sl}r/R$, получаем, что выражение (1) преобразуется к виду:

$$\frac{W_{sl}^2}{R^2} r = g \frac{dz}{dr} \quad (2)$$

Объемы масла и воды в выделенном цилиндре находятся как

$$V_o = \int_0^H \pi r(z)^2 dz \quad (3)$$

$$V_w = \int_0^H \pi (R^2 - r(z)^2) dz \quad (4)$$

Из условия равновесия на границе раздела, разделив переменные и проинтегрировав (2), получим

$$z(r) = \frac{W_{sl}^2}{2gR^2} r^2 + C \quad (5)$$

Постоянная интегрирования определяется как $C = -\frac{W_{sl}^2}{2gR^2} r_0^2$, из условия, что на дне цилиндра ($z = 0$) граница раздела проходит при $r = r_0$

$$z(r) = \frac{W_{sl}^2}{2gR^2} (r^2 - r_0^2) \quad (6)$$

Из условия сохранения объема легкой фазы

$$V_o = \int_0^H \pi r(z)^2 dz = c_x \pi R^2 H \quad (7)$$

Подставив $z(r)$ в формулу (7) и упростив, вычислим интеграл

$$\frac{W_{sl}^2}{4g} \left(R^2 - \frac{r_0^4}{R^2} \right) = c_x H \quad (8)$$

Решим относительно r_0

$$r_0 = \left(R^4 - \frac{4c_x g H R^2}{W_{sl}^2} \right)^{1/4} \quad (9)$$

Выразим $r(z)$

$$r(z) = \left(\left(R^4 - \frac{4c_x g H R^2}{W_{sl}^2} \right)^{0.5} + \frac{2gR^2 z}{W_{sl}^2} \right)^{0.5} \quad (10)$$

где z – продольная координата.

Подставим $z = 0$ в формулу (10)

$$r(0) = \left(R^4 - \frac{4c_x g H R^2}{W_{sl}^2} \right)^{1/4} \quad (11)$$

Подставим $z = H$ в формулу (10)

$$r(H) = \left(\left(R^4 - \frac{4c_x g H R^2}{W_{sl}^2} \right)^{0.5} + \frac{2gR^2 H}{W_{sl}^2} \right)^{0.5} \quad (12)$$

Таким образом, формулы (11), (12) позволяют определить радиус границы раздела легкой и тяжелой фаз на дне $z = 0$ межтрубного пространства

мультивихревого сепаратора и на верхней крышке $z = H$ выделенного цилиндра.

При увеличении концентрации легкой фазы в составе эмульсии наблюдается уменьшение размера отверстия, требуемого для изготовления в днище сепарационной зоны межтрубного пространства мультивихревого сепаратора (рис. 3). Также исследования показали, что при увеличении высоты щели до 15 мм размеры радиуса отверстия уменьшаются, причем предельной высотой сепарационной зоны является значение 50 мм при наибольшей массовой доли легкой фазы в эмульсии 0,25, если $W_{sl} = 5$ м/с; $h_s = 10$ мм. Это связано с изменением условий потока и распределения фаз внутри сепарационной зоны.

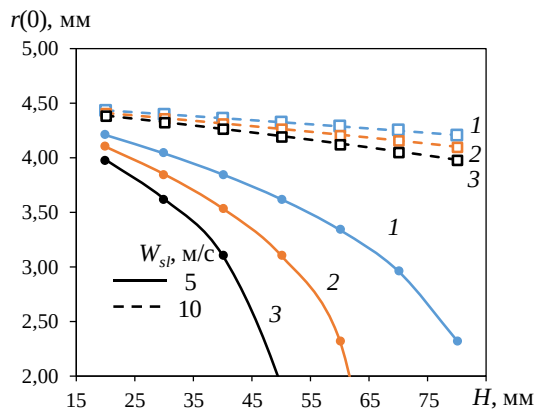


Рис. 3 – Изменение радиуса отверстия для отвода легкой фазы от высоты сепарационной зоны мультивихревого сепаратора H при c_x : 1 – 0,15, 2 – 0,2, 3 – 0,25; W_{sl} , м/с: линия 5, штриховая 10; $h_s = 10$ мм; $R = 4,5$ мм

Fig. 3 – Change in the radius of the light phase outlet opening relative to the height of the separation zone of the multivortex separator H at c_x : 1 – 0,15, 2 – 0,2, 3 – 0,25; W_{sl} , m/s: solid line 5, dashed line 10; $h_s = 10$ mm; $R = 4,5$ mm

Результаты исследований демонстрируют, что изменение массовой доли легкой фазы в эмульсии в диапазоне 0,15–0,25, не сказывается на изменении значений радиуса $r(H)$ при скорости на краю цилиндра 10 м/с (рис. 4). Это может означать, что в данном диапазоне концентраций легкая фаза уже эффективно отделяется и дополнительное увеличение ее концентрации не приводит к значительным изменениям в распределении фаз на верхней крышке.

Вследствие отклонения оси вихря от прямой линии с увеличением высоты сепарационной зоны необходимо ограничить ее путем введения предельной зоны исполнения при массовой доле легкой фазы в эмульсии $H = 70$ мм ($c_x = 0,2$), 60 мм ($c_x = 0,25$) при скорости эмульсии 5 м/с (рис. 4).

Величина параметра R за счет конструктивных особенностей мультивихревого сепаратора ограничивается в диапазоне от 3 до 6 мм, что позволяет поддерживать структуру потока в межтрубном пространстве устройства (рис. 5). Размер значений

радиуса $r(0)$, выполняемого в днище сепаратора для отвода легкой фазы, сопоставим с диаметром самого вихря d_v . Вследствие образования в межтрубном пространстве вихрей большое влияние оказывает величина скорости W_{sl} . Для достижения наибольшей эффективности разделения в мультивихревом сепараторе скорость подачи эмульсии должна быть сбалансированной, поскольку зависит от геометрических размеров прорези во внутреннем цилиндре устройства и характеристик эмульсии. Как правило, при больших скоростях потока наблюдается лучшее разделение.

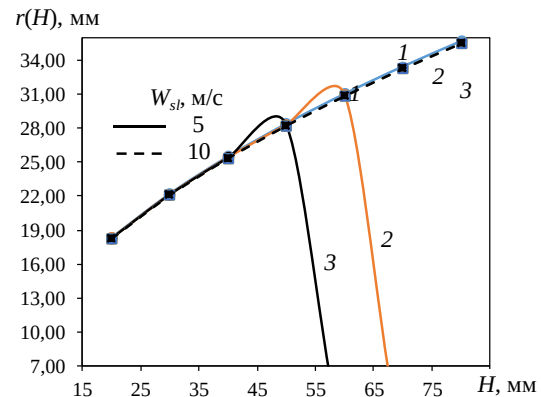


Рис. 4 – Изменение радиуса отверстия для отвода тяжелой фазы от высоты сепарационной зоны мультивихревого сепаратора H при c_x : 1 – 0,15, 2 – 0,2, 3 – 0,25; W_{sl} , м/с: линия 5, штриховая 10; $h_s = 10$ мм; $R = 4,5$ мм

Fig. 4 – Change in the radius of the heavy phase outlet opening relative to the height of the separation zone of the multivortex separator H at c_x : 1 – 0,15, 2 – 0,2, 3 – 0,25; W_{sl} , m/s: solid line 5, dashed line 10; $h_s = 10$ mm; $R = 4,5$ mm

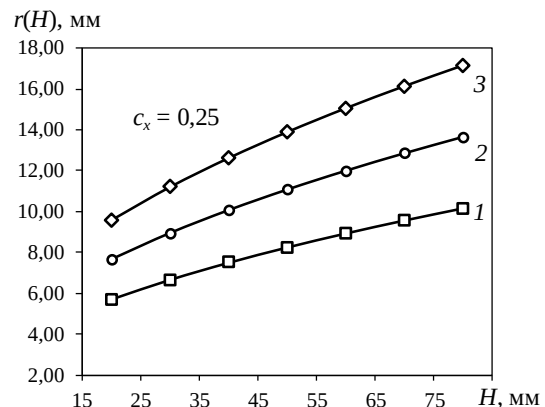


Рис. 5 – Изменение радиуса отверстия для отвода тяжелой фазы от высоты сепарационной зоны мультивихревого сепаратора H при R , мм: 1 – 3, 2 – 4, 3 – 5; $W_{sl} = 12$ м/с; $c_x = 0,25$

Fig. 5 – Change in the radius of the heavy phase outlet opening relative to the height of the separation zone of the multivortex separator H at R , mm: 1 – 3, 2 – 4, 3 – 5; $W_{sl} = 12$ m/s; $c_x = 0,25$

Таким образом, размеры щелевого отверстия во внутренне трубе сепаратора, через которую поступает эмульсия в межтрубное пространство, влияют на гидродинамические условия внутри сепаратора и на образование вихрей. Изменение ширины и высоты щели может изменять скорость и траекторию движения фаз, что в свою очередь влияет на необходимый диаметр отверстий для их отвода. Видно, что диаметр отверстий изменяется в зависимости от концентрации фаз и геометрических параметров сепаратора, что позволяет оптимизировать процесс разделения для достижения наилучших результатов.

Основным преимуществом использования мультивихревого сепаратора для эмульсий с высокой стабильностью или малыми различиями в плотности фаз является то, что время, необходимое для разделения фаз, значительно сокращается. С учетом полученных формул осуществляется поиск оптимальных параметров для повышения эффективности разделения фаз в мультивихревых сепараторах, что позволяет улучшить качество конечного продукта, что важно для различных отраслей, таких как нефтепереработка, химическая промышленность и другие. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации системы сепарации нефти и воды, обоснования выбора конструкции и режимов работы сепаратора, что может привести к снижению энергозатрат на процесс разделения и повысить эффективность процесса. Важно учитывать, что для стабильной работы системы необходимо правильно подобрать конструктивные размеры сепарационной зоны разработанного устройства.

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of sciences (postdoctoral fellows) for the purpose of defending their doctoral dissertation, completing research, as well as performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan «Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan».

Литература

1. M.M. Abdulredha, H.S. Aslina, C.A. Luqman, *Arabian Journal of Chemistry*, **13**, 1, 3403-3428 (2020). DOI: 10.1016/j.arabjc.2018.11.014.
2. А.Б. Голованчиков, М.И. Филимонов, А.Е. Новиков, М.И. Ламскова, *Химическая промышленность сегодня*, 2, 30-36 (2024).
3. X. Cai, Y. Guo, S. Guan, D. Wang, H. Han, Y. Ji, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, **209**, 110195 (2025). DOI: 10.1016/j.cep.2025.110195.
4. Z. Zhang, J. Zhou, T. Hou, J. Xu, Y. Wang, H. Ye, B. Yang, X. Li, *Separation and Purification Technology*, **346**, 127480 (2024). DOI: 10.1016/j.seppur.2024.127480.
5. J. Fink, *Petroleum engineer's guide to oil field chemicals and fluids*. University Leoben, Leoben, 1046 p. (2021).
6. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, В.В. Харьков, А.Р. Галимова, *Вестник технологического университета*, **23**, 7, 61-64 (2020).
7. C.F. Medina-Sandoval, J.A. Valencia-Dávila, M.Y. Combariza, C. Blanco-Tirado, *Fuel*, 2018, **231**, 297-306 (2018).
8. D. Vinh, V. Zinurov, O. Dmitrieva, V. Kharkov, *MATEC Web of Conferences*, **346**, 03077 (2021). DOI: 10.1051/mateconf/202134603077.
9. M. Assar, S. Simon, G.H. Sørland, B.A. Grimes, *Chemical Engineering Research and Design*, **194**, 136-150 (2023). DOI: 10.1016/j.cherd.2023.04.029.
10. Т.Д. Ланина, Н.Н. Прохоренко, Е.С. Селиванова, *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*, 7, 33-38 (2012).
11. V. Zinurov, I. Sharipov, O. Dmitrieva, I. Madyshev, *E3S Web of Conferences*, **157**, 06001 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202015706001.
12. Д.Ю. Верин, С.И. Валеев, В.А. Булкин, *Вестник Казанского технологического университета*, **15**, 15, 117-118 (2012).
13. О.В. Соловьева, С.А. Соловьев, Р.С. Зарипова, А.В. Каляшина, А.В. Чупаев, *Научно-технический вестник Поволжья*, 7, 116-119 (2021).
14. А.Г. Лаптев, Е.А. Лаптева, Р.Я. Исхакова, *Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология*, **65**, 5, 112-120 (2022).
15. А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, В.В. Харьков, В.Э. Зинуров, И.Н. Мадышев, Пат. 205875 РФ, заявл. 18.06.2021; опубл. 11.08.2021, Бюл. № 23.

References

1. M.M. Abdulredha, H.S. Aslina, C.A. Luqman, *Arabian Journal of Chemistry*, **13**, 1, 3403-3428 (2020). DOI: 10.1016/j.arabjc.2018.11.014.
2. A.B. Golovanchikov, M.I. Filimonov, A.E. Novikov, M.I. Lamskova, *Khimicheskaja promyshlennost' segodnja*, 2, 30-36 (2024).
3. X. Cai, Y. Guo, S. Guan, D. Wang, H. Han, Y. Ji, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, **209**, 110195 (2025). DOI: 10.1016/j.cep.2025.110195.
4. Z. Zhang, J. Zhou, T. Hou, J. Xu, Y. Wang, H. Ye, B. Yang, X. Li, *Separation and Purification Technology*, **346**, 127480 (2024). DOI: 10.1016/j.seppur.2024.127480.
5. J. Fink, *Petroleum engineer's guide to oil field chemicals and fluids*. University Leoben, Leoben, 1046 p. (2021).
6. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva, V.V. Kharkov, A.R. Galimova, *Herald of Technological University*, 23, 7, 61-64 (2020).
7. C.F. Medina-Sandoval, J.A. Valencia-Dávila, M.Y. Combariza, C. Blanco-Tirado, *Fuel*, 2018, **231**, 297-306 (2018).
8. D. Vinh, V. Zinurov, O. Dmitrieva, V. Kharkov, *MATEC Web of Conferences*, **346**, 03077 (2021). DOI: 10.1051/mateconf/202134603077.
9. M. Assar, S. Simon, G.H. Sørland, B.A. Grimes, *Chemical Engineering Research and Design*, **194**, 136-150 (2023). DOI: 10.1016/j.cherd.2023.04.029.
10. T.D. Lanina, N.N. Prohorenko, E.S. Selivanova, *Stroi-tel'stvo nefjtjanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more*, 7, 33-38 (2012).

11. V. Zinurov, I. Sharipov, O. Dmitrieva, I. Madyshev, *E3S Web of Conferences*, **157**, 06001 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202015706001.
12. D.Ju. Verin, S.I. Valeev, V.A. Bulkin, *Herald of Kazan Technological University*, **15**, 15, 117-118 (2012).
13. O.V. Solov'eva, S.A. Solov'ev, R.S. Zaripova, A.V. Kaljashina, A.V. Chupaev, *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja*, **7**, 116-119 (2021).
14. A.G. Laptev, E.A. Lapteva, R.Ja. Ishakova, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Serija Himija i himicheskaja tehnologija*, **65**, 5, 112-120 (2022).
15. A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva, V.V. Kharkov, V.E. Zinurov, I.N. Madyshev, Pat. 205875 RF, заявл. 18.06.2021; opubl. 11.08.2021, Bjul. № 23.

© **О. С. Дмитриева** – к.т.н., доцент кафедры Оборудования пищевых производств (ОПП), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, ja_deva@mail.ru; **А. В. Дмитриев** – д.т.н., зав. кафедрой Автоматизации технологических процессов и производств, Казанский государственный энергетический университет, ieremiada@gmail.com; **Н. Ф. Сахибгареев** – аспирант кафедры ОПП, КНИТУ, opp-srv@rambler.ru.

© **O. S. Dmitrieva** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Department of Food Production Equipment (FPE), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, ja_deva@mail.ru; **A. V. Dmitriev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Head of the Department of Automation of Technological Processes and Production, Kazan State Power Engineering University, ieremiada@gmail.com; **N. F. Sakhibgareev** – PhD-student of the FPE department, KNRTU, opp-srv@rambler.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 18.04.25.

Дата принятия рукописи в печать – 15.06.25.