

Исследование смесителя с геликоидной камерой для горной промышленности

А. С. Морин[✉], Э. Ш. Мусазаде, О. С. Игнатова, В. И. Брагин

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет (Институт цветных металлов и материаловедения)»,

г. Красноярск, Российская Федерация

✉ AMorin@sfu-kras.ru

Резюме. Приведены результаты разработки комбинированной сборно-модульной конструкции смесительного устройства геликоидного типа, обеспечивающего перераспределение энергии потока с осевой на тангенциальную составляющую без существенного роста гидравлических потерь. На основе сравнения статического и динамического варианта конструкций смесителя проведено исследование путем CFD-моделирования двухфазной системы с использованием уравнений Навье – Стокса и турбулентной модели Буссинеска. Выполнены расчеты коэффициента гидравлического сопротивления и удельных энергетических затрат. Результаты гидродинамического моделирования показывают, что динамическая компоновка обеспечивает формирование устойчивого закрученного потока без застойных зон и локального недосмешения. Коэффициент гидравлического сопротивления снижается до 0,613 по сравнению с 0,986 для статического варианта, а энергопотребление уменьшается с 30,1 до 25,5 кВт. Полученные результаты подтверждают перспективность применения устройства в процессах подготовки пульпы, реагентных растворов и эмульсионных систем горной промышленности.

Ключевые слова: смеситель, роторный модуль, гидродинамическое моделирование, CFD, динамический завихритель

Для цитирования: Морин А.С., Мусазаде Э.Ш., Игнатова О.С., Брагин В.И. Исследование смесителя с геликоидной камерой для горной промышленности. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 26-32. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-26-32>.

Research on helicoid module mixer for mining industry

A. S. Morin[✉], E. Sh. Musazade, O. S. Ignatova, V. I. Bragin

Siberian Federal University (Institute of Non-Ferrous Metals and Materials Science), Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ AMorin@sfu-kras.ru

Abstract. Mixing in the mining industry plays a key role in the preparation of pulps, backfill mixtures, and reagent solutions. The quality of mixing determines the completeness of physical and chemical processes, the uniformity of component distribution, and the stability of system properties. Effective mixing reduces reagent consumption, increases the recovery of useful components, and ensures the reliability of process equipment. To improve the energy efficiency and reliability of mixing equipment under conditions of high abrasiveness, variable rheology, and unstable process fluid transport conditions, a new combined modular design of a helical mixing device has been proposed. This design redistributes flow energy from the axial to the tangential component without significantly increasing hydraulic losses. A comparison of static and dynamic designs was used to study the two-phase system using CFD modeling using the Navier – Stokes equations and the Boussinesq turbulent model. Calculations of the hydraulic resistance coefficient and specific energy consumption were also performed. Hydrodynamic modeling results show that the dynamic configuration ensures the formation of a stable swirling flow without stagnation zones or localized undermixing. The hydraulic resistance coefficient is reduced to 0.613 compared to 0.986 for the static configuration, and power consumption is reduced from 30.1 to 25.5 kW. These results confirm the device's potential for use in the preparation of slurries, reagent solutions, and emulsion systems in the mining industry.

Keywords: mixer, rotor module, computational fluid dynamics (CFD) simulation, dynamic swirler

For citation: Morin A.S., Musazade E.Sh., Ignatova O.S., Bragin V.I. Research on helicoid module mixer for mining industry. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 26-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-26-32>.

Введение

Современное горнодобывающее производство характеризуется высокой степенью интенсификации и усложнением технологических схем переработки минерального сырья [1]. В этих условиях особую роль играет совершенствование оборудования, обеспечивающего подготовку пульп, растворов и закладочных смесей, среди которого устройства для перемешивания материалов (смесители) занимают одно из ключевых мест [2, 3].

Смесители материалов являются критическим «сквозным» звеном, определяющим скорость и полноту технологических схем путем обеспечения выравнивания концентраций реагентов, формирования и поддержания дисперсий, управления структурой флоккул и предотвращения локальных зон недосмешения, которые ведут к росту расхода реагентов, ухудшению осаждения и фильтрации, повышению износа и ухудшению надежности работы всего технологического комплекса [4–6]. При этом реальные промышленные режимы характеризуются высокой абразивностью, переменной реологией и колебаниями расхода, поэтому задача выбора и обоснования устройства для перемешивания материалов имеет одновременно технологическую и эксплуатационно-экономическую природу.

Статические смесители широко применяются в непрерывных технологических процессах горной и перерабатывающей промышленности, где востребованы энергоэффективность и надежность оборудования [7]. Их можно классифицировать по типу применяемых завихряющих модулей на смесители на основе пластинчатых и гофрированных вставок, а также спиральных и винтовых элементов. По сравнению с приводными аналогами они характеризуются пониженным энергопотреблением и минимальными затратами на техническое обслуживание [8].

Однако для ряда задач их использование сопровождается недостаточно эффективным преобразованием энергии потока, значительным перекрытием проходного сечения и, как следствие, ростом гидравлических сопротивлений и потерей напора. Кроме того, конструктивные особенности статических смесителей ограничивают их функциональные возможности [9]. В связи с этим для специфических условий горной промышленности требуется конструкция смесителя, свободная от указанных недостатков.

Выбор направления исследований

При изучении вышеизложенной проблемы, а также учитывая множество существующих конструкций смесителей на сегодняшний день, в Сибирском федеральном университете была разработана комбинированная сборно-модульная конструкция геликоидного смесительного устройства на базе завихрителя потока¹ и роторного модуля².

Разработанное устройство (рис. 1) состоит из трех основных составляющих частей: камеры впуска дисперсионной

среды 1, устройства ввода дисперсной фазы 2 и камеры смешения 3.

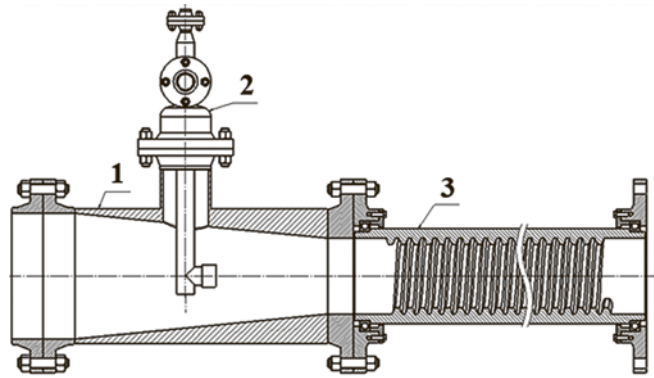


Рис. 1. Смесительное устройство с роторным модулем: 1 – камера впуска; 2 – устройство ввода; 3 – роторный модуль /
Fig. 1. Mixing device with a rotary module: 1 – inlet chamber; 2 – input device; 3 – rotary module

Отличием от стандартных устройств является особая конструкция камеры смешения 3, представляющая собой гидравлическую камеру с внутренним геликоидным рельефом, установленную в подшипниках с возможностью вращения вокруг оси. Такого рода гидравлические камеры, помимо смесителей, могут применяться в конструкции других устройств, в частности расходомеров [10], и кавитационных генераторах [11]. Конструкция обладает модульным принципом исполнения, что позволяет адаптировать ее под различные расходы и физико-химические свойства обрабатываемых сред без принципиального изменения технологической схемы [12].

Геликоидный смеситель (рис. 1) работает следующим образом. В первый блок (трубу с конусным профилем) поступает основная жидкость, которую необходимо смешать с реагентом или любой другой жидкостью, подаваемой в устройстве ввода 2. В камере смешения 3 осуществляется механическое воздействие на структуру смешиваемых сред посредством интенсивного вращения.

Цель исследований: анализ технологических возможностей нового геликоидного смесительного устройства, предназначенного для применения в технологических процессах горной промышленности, применительно к процессу гомогенизации системы жидкость – жидкость.

Идея работы: проведение сравнительного анализа гидродинамических характеристик потока и энергопотребление при работе с жидкими средами при статичной и динамичной вариантах компоновок.

Материал и методы исследования

Согласно опытным исследованиям Л. М. Милштейна и другим [9], каждая конструкция завихряющего элемента имеет отличные параметры и характер влияния на поток. В работе представлены экспериментальные кривые для расчета гидравлических сопротивлений для различного вида смесителей (рис. 2).

На основании экспериментальных данных были определены уравнения регрессии в экспоненциальном виде для четырех конструкций завихряющих элементов.

Расчет средних значений функций на заданных промежутках проведен согласно

¹Патент № 2695735 С1 Российская Федерация, МПК F15D 1/12, E21B 41/00. № 2018143155: заявл. 05.12.2018; опубл. 25.07.2019 / К.А. Башмур, Э.А. Петровский; заявитель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

²Патент № 2781027 С1 Российская Федерация, МПК F03B 13/00, E21B 41/00, E21B 37/00. № 2022112346: заявл. 04.05.2022; опубл. 04.10.2022 / К.А. Башмур, Э.Ш. Мусазаде; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»

$$\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx \Rightarrow \int_a^b f(x) dx. \quad (1)$$

Средние значения различных профилей представлены на диаграмме (рис. 2).

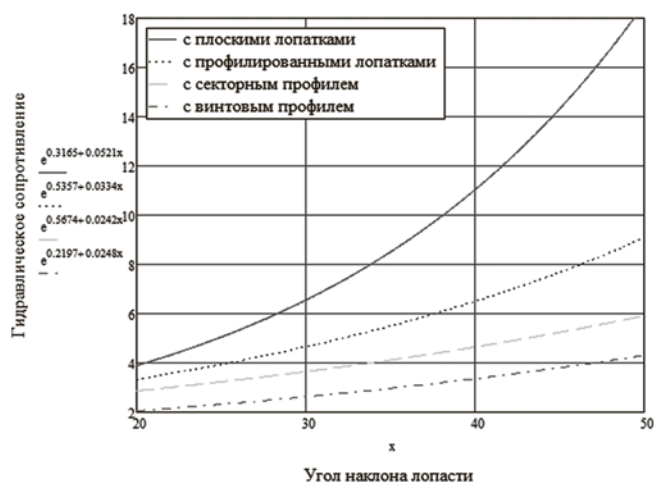


Рис. 2. Диаграмма средних значений гидравлических сопротивлений для различных конструкций /

Fig. 2. Diagram of average values of hydraulic resistance for different designs

Согласно рисунку 2, показатель гидравлических сопротивлений у осевого модуля с винтовым профилем значительно ниже других профилей завихряющего модуля. Это связано с тем, что винтовой профиль создает меньше гидравлических сопротивлений. Также к достоинствам винтового профиля можно отнести то, что данные конструкции не требуют подвода электроэнергии, они безопасны, долговечны за счет минимальной номенклатуры задействованных элементов, а также в них отсутствует возможность облитерации каналов механическими примесями в отличие от решетчатых и пластинчатых модулей. Однако, несмотря на все достоинства винтового профиля, является очевидным, что наличие геликоидной вставки в трубе без дополнительного воздействия на поток создаст слабую степень диспергирования и недостаточное перемешивание.

В отличие от статических смесительных устройств в геликоидном смесителе элементы, обеспечивающие взаимодействие с потоком, размещены по периферии – на внутренней поверхности камеры смешения.

Такая конструктивная схема принципиально изменяет характер гидродинамических процессов.

Во-первых, обеспечивается сохранение требуемой мощности потока, определяемой произведением перепада давления на объемный расход, поскольку рабочий объем камеры увеличивается, а суммарные гидравлические сопротивления снижаются.

Во-вторых, энергия потока расходуется преимущественно не на его торможение, как это характерно для статических элементов, а на приведение во вращение камеры смешения с геликоидальным рельефом. Это приводит к формированию выраженных тангенциальных и радиальных составляющих скорости, обеспечивающих переориентацию направлений движения потока и интенсификацию процессов деформации, диспергирования и перемешивания фаз.

В-третьих, совокупное действие вращения камеры и движения потока создает синергетический эффект, сопровожда-

ющийся увеличением центробежных и гравитационных сил, воздействующих на дисперсную фазу, что способствует более эффективному перераспределению компонентов системы.

В-четвертых, эксплуатация оборудования во вращающемся режиме снижает вероятность образования и закрепления отложений на рабочих поверхностях. Это обусловлено уменьшением застойных зон, наличием сдвиговых напряжений и периодической сменой направления локальных скоростей, что препятствует зарождению и росту центров кристаллизации.

Таким образом, в разработанной модели происходит повышение однородности компонентов при их смешении, а также увеличивается дисперсность вводимой жидкости.

Для оценки течения потоков было произведено гидродинамическое моделирование (CFD) двухфазной системы в SolidWorks Flow Simulation.

Исходные параметры для моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Параметры для исследования /
Parameters for research

Параметр	Значение
Давление, МПа	1,33
Внутренний диаметр, мм	200
Внешний диаметр, мм	299
Количество витков, шт.	19
Объемный расход, м³/с	0,167
Плотность дисперсионной среды, кг/м³	820
Плотность дисперсной фазы, кг/м³	997

Программный комплекс SolidWorks относится к пакетам 3D-моделирования среднего уровня. Входящий в его состав прикладной модуль гидродинамического моделирования Flow Simulation сочетает высокоуровневую функциональность с точностью и простотой пользования. Он позволяет решать целый комплекс задач, используя при этом математическую модель Навье – Стокса движения вязкой по Ньютону жидкости [13].

Уравнение сохранения массы выражается так [14]:

$$\frac{d}{dx_i}(\bar{v}_i) = 0. \quad (2)$$

Уравнение сохранения импульса с учетом стационарного течения и инерционной системы [16]:

$$\rho \bar{v}_i \frac{d\bar{v}_i}{dx_j} = -\frac{d\bar{p}_i}{dx_i} + \mu \frac{d^2 \bar{v}_i}{dx_j^2} - \rho \frac{d}{dx_j} \bar{v}_i \bar{v}_j + \rho g. \quad (3)$$

В целом явление турбулентности и вязкий тензор группируются. Таким образом, общий вид тензора имеет вид [16]:

$$\tau_{gij} = -\rho \bar{v}_i \bar{v}_j + \mu \left(\frac{d\bar{v}_i}{dx_j} + \frac{d\bar{v}_j}{dx_i} \right). \quad (4)$$

Тензор Рейнольдса τ_i можно смоделировать, используя гипотезу Буссинеска, представленную в турбулентной вязкости μ_t [17]:

$$-\rho \bar{v}_i \bar{v}_j = \mu_t \left(\frac{d\bar{v}_i}{dx_j} + \frac{d\bar{v}_j}{dx_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{dv_k}{dx_k} \right) \sigma_{ij}. \quad (5)$$

Расчетная сетка используемой при моделировании вычислительной области для предложенной конструкции смесителя представлена на рисунке 3 (см. цв. вклейку на стр. 30).

В расчетной сетке область геликоидного рельефа имеет высокую степень дробления, так как эта конструктивная часть является наиболее значимой и сложной в данной модели, а также требует получения наиболее точных результатов расчетов. Полученная сеточная модель содержит 285 820 элементов.

Результаты и их обсуждение

По результатам исследования была получена эпюра течения скорости в области моделирования (рис. 4) (см. цв. вклейку на стр. 30).

Из эпюры распределения скорости видно, что происходит перераспределение энергии в смесителе с осевой скорости на окружную. Другими словами, центральному потоку предается окружная составляющая и искусственно создается завихрение, что является главной особенностью смесительных устройств, влияющих на качество перемешивания.

В результате моделирования также была построена эпюра завихренности потока на выходе из камеры смешения (рис. 5). Линии завихренности имеют плавный дугообразный профиль, скругляющийся к центру. Помимо этого, на выходе из камеры смешения отсутствуют зоны недосмешения и зоны с нарушениями траектории потока, что говорит об эффективном и последовательном вовлечении слоев, начиная с граничного.

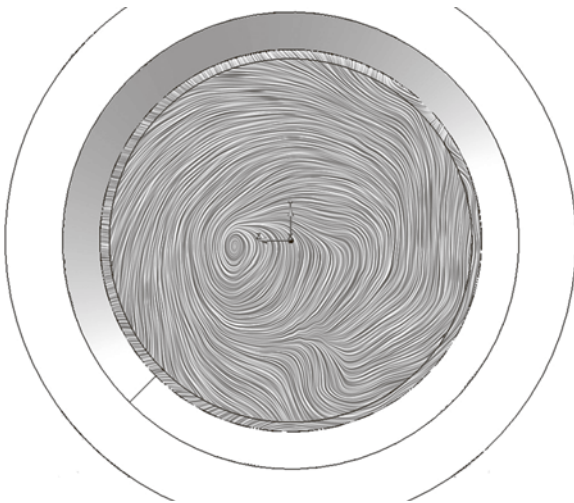


Рис. 5. Эпюра завихренности потока в поперечном сечении роторного модуля /

Fig. 5. Flow vorticity diagram in the cross-section of the rotor module

Следующим шагом при исследовании конструкции было проведение сравнения потоков в камере смешения при статической и динамической компоновках смесителя.

Полученные модели течения гетерогенных жидкостей для сравнения представлены на рисунке 6 (а и б соответственно) (см. цв. вклейку на стр. 30).

По результатам численного моделирования установлено, что в статическом смесителе (рис. 6б) наблюдается неравномерное распределение скоростного поля: основной поток прижимается к нижней части трубопровода, формируя зоны локального сгущения вследствие недостаточной турбулизации. Часть частиц транспортируется практически без закру-

тки, их траектории характеризуются слабовыраженной пространственной ориентацией, что свидетельствует о низкой степени вовлеченности в процесс смешения. Визуализация линий тока на рисунке 6б подтверждает снижение завихренности потока и, как следствие, меньшую эффективность перемешивания. Все эти недостатки отсутствуют в модели смесителя с динамической компоновкой (рис. 6а). Наглядно видно, что траектория потока имеет завихренную форму, обеспечивающую равномерное распределение вводимого компонента по сечению трубопровода. При этом оседание частиц на нижней поверхности не наблюдается, компоненты вовлекаются в общий поток и интенсивно перемешиваются за счет радиально-тангенциальной переориентации скоростей.

Согласно [14–16], основными параметрами, по которым можно провести сравнительную оценку смесительных устройств, являются эффективность и интенсивность перемешивания, а также затраченная на перемешивание энергия. Эффективность перемешивания наглядно представлена в результатах моделирования, а интенсивность перемешивания определялась расчетным методом.

Интенсивность перемешивания I характеризуется удельными энергетическими затратами $N_{\text{п}}$, необходимыми для перемешивания единицы объема жидкости в единицу времени при достижении заданного качества смеси. Данный показатель отражает энергетическую нагрузку на систему и традиционно применяется для оценки статических смесителей, в которых перепад давления формируется на уже смешанном потоке, а подача дополнительного компонента осуществляется без создания значительного локального давления.

В рассматриваемой конструкции повышение перепада давления преимущественно связано с подачей вводимого компонента, тогда как для основного потока смеси гидравлические потери остаются незначительными. Снижение удельных энергозатрат достигается за счет существенно меньшего (до двух порядков) объемного расхода вводимого компонента по сравнению с расходом основного потока, что обеспечивает энергетическое преимущество предлагаемой схемы смешения.

Применительно к процессам, протекающим в динамических смесителях, энергия $N_{\text{п}}$, которую необходимо затратить на перемещение, была рассчитана по формуле

$$N_{\text{п}} = \Delta P \cdot V, \quad (6)$$

где ΔP – перепад давления, Па; V – объемный расход, м³/с.

Значение гидравлического сопротивления ξ определялось по формуле

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta P}{\rho \cdot v^2}, \quad (7)$$

где ρ – плотность, кг/м³, v – средняя скорость потока, м/с.

На основании полученных результатов из моделирования и расчетов проведено их сравнение (табл. 2).

Согласно результатам оценки значимых параметров, полученным в ходе исследования конструкции при помощи гидродинамического моделирования, можно сделать выводы, что конструкция с динамическим роторным модулем затрачивает меньше энергии на единицу объема жидкости в единицу времени для достижения определенного качества смеси.

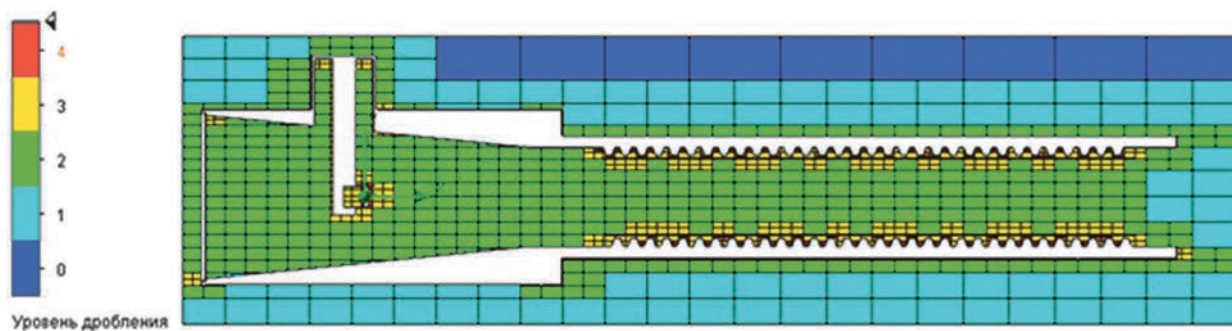


Рис. 3. Расчетная сетка модели / Fig. 3. Calculation grid of the model

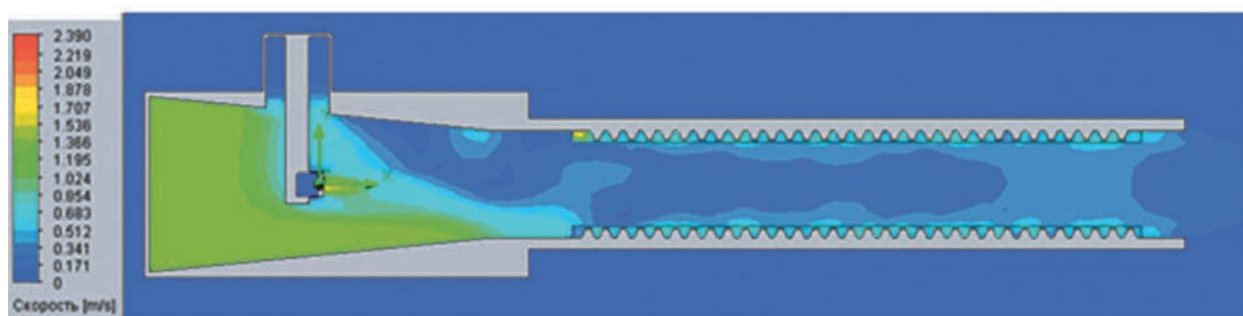


Рис. 4. Эпюра скорости в области моделирования / Fig. 4. Velocity diagram in the simulation area

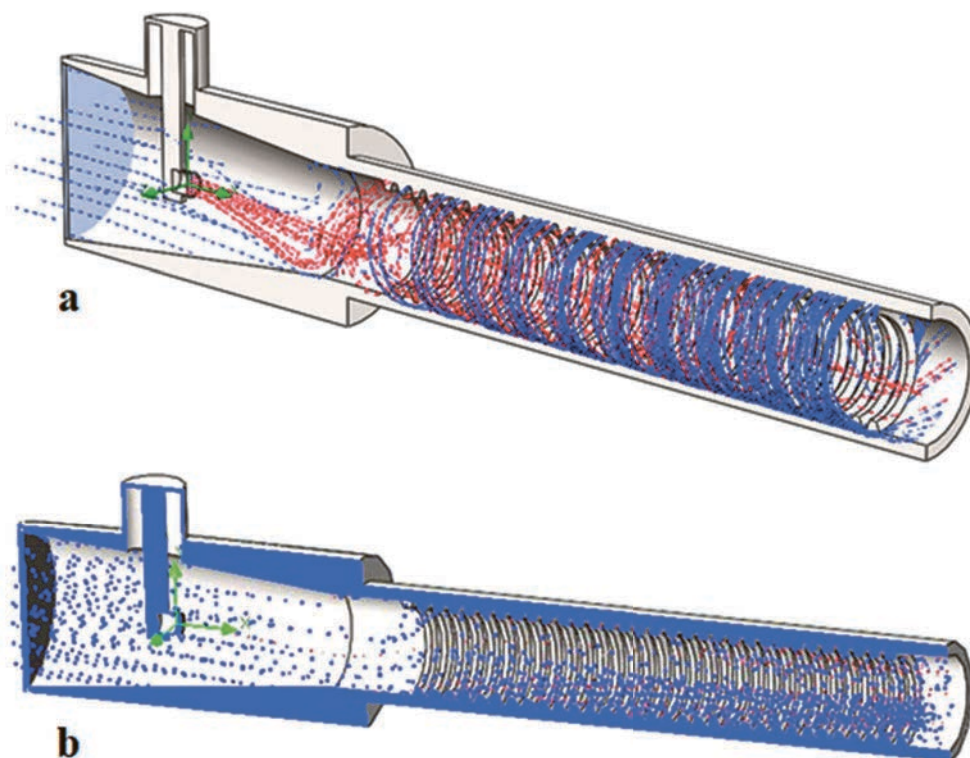


Рис. 6. Моделирование течения потока: а – динамическая компоновка; б – статическая компоновка / Fig. 6. Flow simulation: a – dynamic layout; b – static layout

Таблица 2 / Table 2

Сравнение полученных результатов из анализа двух конструкций / Comparison of the results obtained from the analysis of two designs

Тип смесителя	Гидравлическое сопротивление ξ	Затрачиваемая энергия N_{Π}
Динамический роторный	0,613	25,5 кВт
Статичный	0,986	30,1 кВт

Выводы

1. Предложена и исследована новая комбинированная сборно-модульная конструкция геликоидного смесительного устройства на базе роторного модуля, отличающаяся размещением геликоидного рельефа на внутренней поверхности вращающейся камеры смешения. Разработанная конструкция может быть использована в процессах подготовки пульпы, реагентных растворов и эмульсионных систем в горной промышленности, где требуется интенсификация массообмена при ограниченных энергетических ресурсах.

2. Проведенное CFD-моделирование двухфазной системы показало, что применение геликоидного смесительного устройства с роторным модулем обеспечивает формирование выраженной тангенциальной составляющей скорости и устойчивого закрученного потока, что способствует интенсификации процессов смешения фаз системы жидкость – жидкость.

3. Установлено, что в динамической компоновке смеси-

теля отсутствуют застойные зоны и локальные области недосмешения, характерные для статической конструкции. Поток равномерно вовлекает дисперсную фазу, обеспечивая последовательное перераспределение компонентов по всему объему камеры смешения.

4. Расчет гидравлического сопротивления показал снижение коэффициента для динамической конструкции на 60 % по сравнению со статичной, что свидетельствует о более рациональном использовании энергии потока.

5. Определено, что затрачиваемая мощность N_{Π} при использовании роторного модуля на 18 % меньше статического аналога, что подтверждает снижение энергоемкости процесса перемешивания при сохранении требуемого качества смеси.

6. Установлено, что перераспределение энергии с осевой составляющей скорости на окружную позволяет повысить интенсивность перемешивания без существенного увеличения гидравлических потерь, обеспечивая синергетический эффект совместного действия вращения камеры и основного потока.

7. Полученные результаты подтверждают технологическую целесообразность применения геликоидного смесительного устройства в процессах подготовки жидких и гетерогенных систем горной промышленности, где предъявляются повышенные требования к энергоэффективности, надежности и устойчивости оборудования к абразивному износу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCE

1. Turgeon K., Boulanger J.-F., Bazin C. Simulation of Solvent Extraction Circuits for the Separation of Rare Earth Elements. *Minerals*. 2023; 13 (6): 714. <https://doi.org/10.3390/min13060714>.
2. Han J.R., Kim H.I., Shim H.W., Choi J.W., Je J. 3D-CFD based optimization of a mixer-settler: Part I. Development of a model for efficient pump-mixer system in mixer-settler. *Chemical Engineering Research and Design*. 2025; 220: 610-622.
3. Pradhan A.R. Rheology-driven approaches in slurry transportation: Influence of bimodal mixtures, additives, and modelling perspectives. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2025: 103714.
4. Anderson C.G. Advances in Mineral Processing and Hydrometallurgy. *Metals*. 2025; 15: 1357. <https://doi.org/10.3390/met15121357>.
5. Вопилин Р.С., Иодис В.А. Каскадная реакторная установка для бактериально-химического выщелачивания руд. *Маркишейдерия и недропользование*. 2024; 5: 49-54. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_49_54.
6. Vopilin R.S., Iodis V.A. Cascade reactor plant for bacterial-chemical leaching ore. *Mine Surveying and Subsurface use*. 2024; 5: 49-45. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_49_54.
7. Wang D. et al. Numerical simulation of pressure profile of mining backfill fly-ash slurry in an L-shaped pipe using a validated Herschel-Bulkley model. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2023; 12 (3): 219-233.
8. Ghanem A., Lemenand T., Della Valle D., Peerhossaini H. Static mixers: Mechanisms, applications, and characterization methods: A review. *Chemical Engineering Research and Design*. 2014; 92 (2): 205-228. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.07.013>.
9. 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. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.11.016>.
10. Милштейн Л.М., Бойко С.И., Запорожец Е. П. Нефтегазопромысловая сепарационная техника: справочное пособие. Москва, 1991: 232. Milshteyn L.M., Boyko S.I., Zaporozhets E.P. Oil and Gas Field Separation Equipment: A Reference Guide. Moscow, 1991: 232. (In Russ.).
11. Bashmur K.A., Bukhtoyarov V.V., Sergienko R.B. Improving the quality of turbine flowmeters on the basis of the use of a rotor with internal screw relief. *SOCAR Proceedings*. 2022; S1: 48-53. <https://doi.org/10.5510/OGP2022SI100686>.
12. Мусазадэ Э.Ш., Башмур К.А., Бухтояров В.В. и др. Кавитатор на основе трубки Вентури с винтовым рельефом поверхности для габаритно-ограниченных гидравлических каналов. *Нефтегазовое дело*. 2022; 20 (6): 228-239. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-6-228-239>.
13. Musazade E.Sh., Bashmur K.A., Bukhtoyarov V.V., et al. Cavitator based on a Venturi tube with a helical surface relief for dimension-limited hydraulic channels. *Petroleum Engineering*. 2022; 20 (6): 228-239. (In Russ.). <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-6-228-239>.
14. Петровский Е.А., Башмур К.А., Шадчина Ю.Н. и др. Исследование технологии формирования микрорельефа на подшипниках скольжения для центробежных установок нефтегазовой отрасли. *Журнал физики: Серия конференций: Международная научная конференция по прикладной физике, информационным технологиям и инженерии «АПИТЕК-2019»*. Красноярск, 2019; 1399: 55032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055032>.
15. Petrovsky E.A., Bashmur K.A., Shadchina Yu.N., et al. Study of microrelief forming technology on sliding bearings for oil and gas centrifugal units. *Journal of Physics: Conference Series: International Scientific Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering APITECH-2019*. Krasnoyarsk, 2019; 1399: 55032. (In Russ.). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055032>.
16. Ascensão L.F., Barbosa I.S.O., et al. CFD Simulation of a High Shear Mixer for Industrial AdBlue Production. *Mathematics*. 2025; 13 (24): 4027. <https://doi.org/10.3390/math13244027>.

14. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах: физические основы и инженерные методы расчета. Ленинград, 1984: 336.
Braginskiy, L.N., Begachev, V.I., Barabash, V.M. Mixing in liquid media: physical principles and engineering calculation methods. Leningrad, 1984: 336. (In Russ.).
15. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: в 2 ч. Москва, 2002: 368.
Dutnerovskiy Yu.I. Processes and apparatuses of chemical technology: in 2 parts. Moscow, 2002: 368. (In Russ.).
16. Айнштейн В.Г. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Москва, 1999: 888.
Ainshtein, V.G. General course of processes and apparatuses of chemical technology. Moscow, 1999: 888. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей Степанович Морин –

д-р техн. наук, заведующий кафедрой горных машин и комплексов института цветных металлов. ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация; e-mail: AMorin@sfu-kras.ru

Эльвин Шакир оглы Мусазаде –

аспирант, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

Ольга Сергеевна Игнатова –

канд. техн. наук, доцент кафедры горных машин и комплексов института цветных металлов, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

Виктор Игоревич Брагин –

д-р техн. наук, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых. ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

Критерии авторства:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.02.2026

Поступила после рецензирования: 21.03.2026

Принята к публикации: 05.04.2026

ABOUT THE AUTHORS

Andrey S. Morin –

Dr. Sci. (Eng.), Head of the Mining Machinery and Complexes Department at the Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; e-mail: AMorin@sfu-kras.ru

Elvin Sh. Musazade –

Postgraduate Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Olga S. Ignatova –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mining Machinery and Complexes Department at the Institute of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Viktor I. Bragin –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Mineral Processing, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Contribution:

The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 15.02.2026

Revised: 21.03.2026

Accepted: 05.04.2026