

ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ЖИДКИХ СРЕД В АППАРАТЕ ВОЛНОВОГО ТИПА

Цыретаров О.Ж., Веригин А.Н., Коробчук М.В.

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет), Санкт-Петербург*

Ключевые слова: перемешивание, вибрационные технологии, волновой смеситель, колебательное движение, скорость диссипации энергии, вихревые структуры.

Аннотация. С использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics выполнено численное моделирование нестационарного течения жидкости в аппарате волнового типа с колебательным движением мешалки. В работе проведено двумерное и трёхмерное моделирование, позволившее проанализировать временную эволюцию полей скоростей в течение одного периода колебаний, а также исследовать пространственную структуру течения в объёме аппарата и особенности формирования течения в различных зонах. Показано, что колебательное движение мешалки приводит к формированию волновых и вихревых структур, обеспечивающих вовлечение значительной части жидкости в движение и снижение застойных зон. Установлено, что характер течения существенно зависит от частоты колебаний, а также геометрических параметров мешалки и условий возбуждения потока. Для количественной оценки интенсивности перемешивания использована средняя по объёму скорость диссипации энергии как интегральный критерий эффективности процесса. Показано, что увеличение частоты колебаний в целом приводит к росту интенсивности перемешивания, однако в определённом диапазоне частот наблюдаются нелинейные эффекты, связанные с особенностями взаимодействия колебательного движения мешалки с жидкостью и перераспределением энергии в потоке. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и оптимизации конструкций волновых смесителей и выборе рациональных режимов их работы.

MIXING OF LIQUID MEDIA IN A WAVE-TYPE APPARATUS

Tsyretarov O.Zh., Verigin A.N., Korobchuk M.V.

Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Saint Petersburg

Keywords: vibration technologies, mixing, wave mixer, oscillatory motion, energy dissipation rate, vortex structures.

Abstract. A numerical study of unsteady fluid flow in a wave-type mixing apparatus with oscillatory motion of the impeller was carried out using COMSOL Multiphysics. Both two-dimensional and three-dimensional simulations were performed to analyze the temporal evolution of velocity fields during one oscillation cycle and to investigate the spatial structure of the flow within the working volume of the apparatus, as well as the features of flow formation in different regions. The results demonstrate that the oscillatory motion of the impeller leads to the formation of wave and vortex structures, which ensure the involvement of a significant portion of the liquid in motion and reduce the formation of stagnant zones. It was established that the flow pattern strongly depends on the oscillation frequency, as well as on the geometric parameters of the impeller and the conditions of flow excitation. For quantitative evaluation of mixing intensity, the volume-averaged energy dissipation rate was used as an integral criterion of process efficiency. It was shown that an increase in oscillation frequency generally results in higher mixing intensity; however, nonlinear effects were observed within a certain frequency range due to the interaction between the oscillatory motion of the impeller and the fluid and the redistribution of energy in the flow. The obtained results can be applied in the design and optimization of wave-type mixing devices and in the selection of optimal operating conditions.

Введение

Перемешивание жидких сред является одной из важных операций химической технологии, от эффективности которой зависят интенсивность массо- и теплообмена [1, 2], а также однородность обрабатываемой среды.

В традиционных аппаратах повышение интенсивности перемешивания обычно достигается увеличением скорости вращения мешалки, что сопровождается ростом энергозатрат и нагрузок на элементы конструкции [2, 3]. Поэтому актуальной является задача формирования интенсивных течений в жидкости без создания устойчивого вращательного движения потока жидкости.

Перспективным подходом является использование колебательного движения мешалки, при котором в жидкости возбуждаются волновые и вихревые структуры, способствующие вовлечению значительной части рабочего объёма в движение [4, 5].

Цель работы заключается в численном исследовании течения жидкости в аппарате волнового типа и оценке влияния частоты колебаний и диаметра мешалки на интенсивность перемешивания. Для достижения поставленной цели выполнено двумерное и трёхмерное численное моделирование в COMSOL Multiphysics, проанализированы поля скоростей и зависимость средней по объёму скорости диссипации энергии от частоты колебаний при двух вариантах диаметра мешалки.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования являлся лабораторный волновой смеситель, включающий цилиндрический корпус 2, мешалку с лопастями 1, шаговый двигатель 3 и узел преобразования движения 4. Конструкция аппарата обеспечивает неподвижность корпуса, при этом мешалка совершает колебательные и возвратно-вращательные движения, за счёт которых формируется нестационарное течение жидкости.

Численное моделирование выполнялось в программной среде COMSOL Multiphysics. Основной расчёт проводился в двумерной нестационарной постановке, а трёхмерная модель использовалась для качественной оценки пространственной структуры течения [6, 2]. Перемешиваемая среда рассматривалась как однородная несжимаемая ньютоновская жидкость с постоянными физическими свойствами. Начальные условия соответствовали состоянию ее покоя.

Движение мешалки задавалось в виде гармонического закона изменения угловой скорости с функцией плавного разгона, обеспечивающей постепенное включение колебательного режима. На внутренних поверхностях корпуса задавались граничные условия прилипания, а движение жидкости возбуждалось исключительно за счёт колебаний мешалки. Для описания течения использовался интерфейс Turbulent Flow, SST. Расчётная область дискретизировалась неструктурированной треугольной сеткой с уплотнением вблизи кромок рабочих элементов. Учёт движения мешалки осуществлялся методом деформируемой расчётной сетки. Расчёт выполнялся в нестационарной постановке с временным шагом, обеспечивающим воспроизведение структуры течения во время одного и нескольких периодов колебаний.

SST-модель сочетает преимущества $k-\omega$ -модели вблизи стенок и $k-\varepsilon$ -подхода в основной области течения, что позволяет более адекватно описывать переходные режимы течения и развитие переходных структур, возникающие при колебательном возбуждении жидкости. При этом использование SST-модели не накладывает чрезмерных требований на вычислительные ресурсы, что является важным фактором для нестационарных расчётов.

Результаты

В результате двумерного численного моделирования получены нестационарные поля модуля скорости в рабочей зоне волнового смесителя для различных моментов времени во время одного периода колебаний мешалки. Как показано на рисунке 2, с шагом времени 0,024 в течение колебательного цикла 0,072 с в жидкости формируется нестационарное поле скоростей, при котором области повышенных скоростей первоначально локализуются вблизи кромок рабочих элементов, а затем распространяются в окружающий объём жидкости.

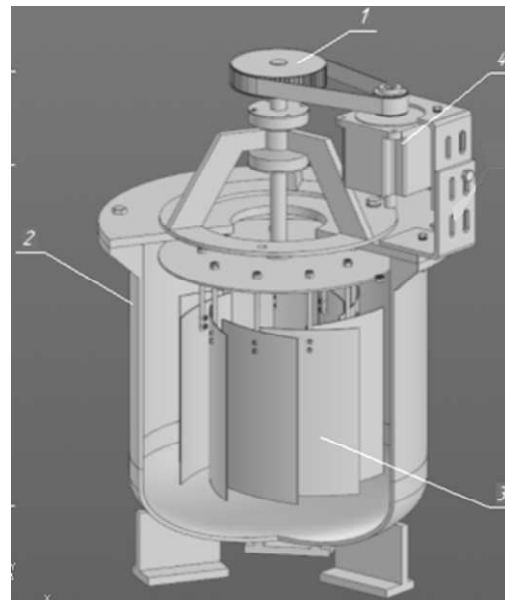


Рис. 1. Конструктивная схема лабораторного волнового смесителя: 1 – узел преобразования движения (привод колебаний); 2 – корпус (рабочая ёмкость); 3 – мешалка; 4 – шаговый электродвигатель

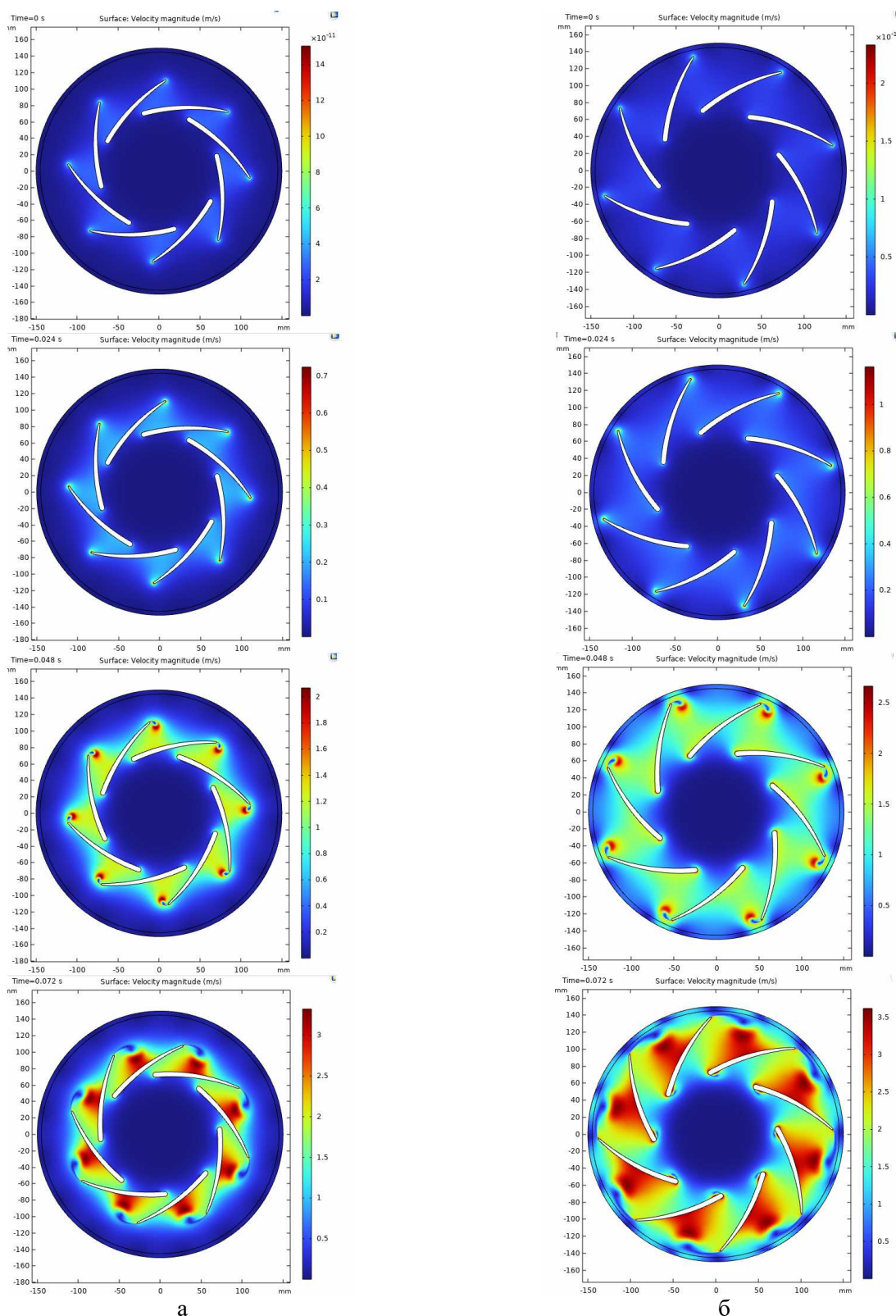


Рис. 2. Поле модуля скорости в рабочей зоне волнового смесителя: а – минимальный диаметр мешалки; б – максимальный диаметр мешалки

По мере развития колебательного движения в рабочей зоне аппарата формируются замкнутые вихревые структуры. Наибольшая интенсивность течения наблюдается при максимальной амплитуде колебаний, когда области повышенных скоростей охватывают значительную часть рабочей зоны аппарата. При переходе к следующему периоду характер распределения скоростей воспроизводится, что указывает на установление квазипериодического режима течения.

Существенное влияние на структуру течения оказывает диаметр мешалки. При минимальном диаметре мешалки поток носит более локальный характер, а зоны повышенных скоростей сосредоточены преимущественно вблизи кромок рабочих элементов. При максимальном диаметре мешалки течение становится более интенсивным, а скоростные возмущения распространяются на большую часть рабочего объёма. Это указывает на более эффективное вовлечение жидкости в движение при увеличении угла установки лопастей.

Для количественной оценки интенсивности перемешивания использовалась средняя по объёму скорость диссипации энергии [4, 6, 7]. Локальная скорость диссипации определялась по полю скоростей, полученному в результате численного моделирования, а её локальное значение рассчитывалось по формуле:

$$\varepsilon = 2 \cdot \mu \cdot S_{ij} \cdot S_{ij}, \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости; S_{ij} – тензор скоростей деформаций, определяемый выражением:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad (2)$$

u_i, u_j – компоненты вектора скорости жидкости; x_i, x_j – пространственные координаты.

Для анализа энергетической эффективности перемешивания использовалась средняя по объёму скорость диссипации энергии, вычисляемая по формуле:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon dV, \quad (3)$$

где V – объем рабочей зоны аппарата.

Выводы

Зависимость средней по объёму скорости диссипации энергии от частоты колебаний рабочих элементов волнового смесителя представлена на рисунке 3.

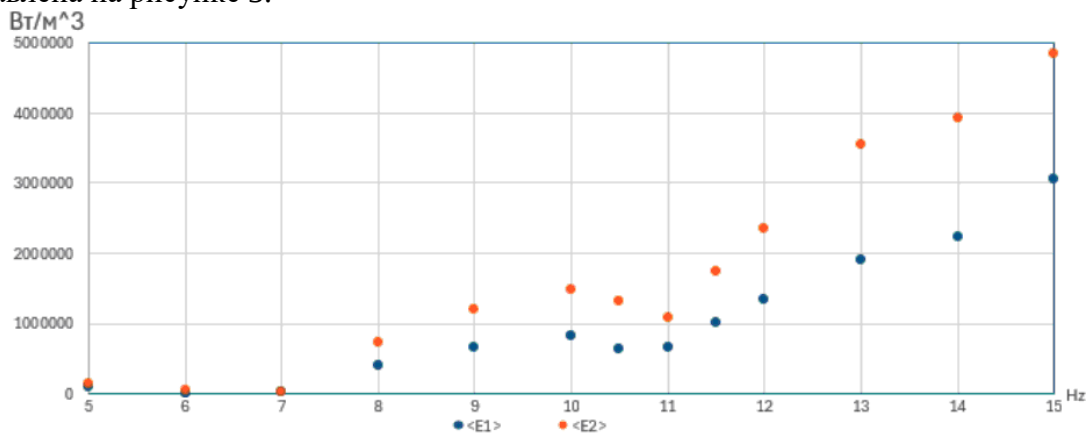


Рис. 3. Зависимость средней по объёму скорости диссипации энергии $\langle \varepsilon \rangle$ от частоты колебаний рабочих элементов волнового смесителя (ε_1 – минимальный диаметр мешалки; ε_2 – максимальный угол диаметр мешалки)

В диапазоне низких частот $f = 5-7$ Гц значения $\langle \varepsilon \rangle$ для обоих вариантов диаметра мешалки невелики и близки между собой, что соответствует локальному характеру течения.

При увеличении частоты до 8-10 Гц наблюдается рост $\langle \varepsilon \rangle$, что указывает на усиление взаимодействия мешалки с жидкой средой и развитие более интенсивных волновых и вихревых течений [4, 5]. В интервале 10-12 Гц отмечается снижение диссипации энергии, связанное с особенностями взаимодействия колебательного движения мешалки с жидкостью.

При дальнейшем увеличении частоты до 12-15 Гц значения $\langle \varepsilon \rangle$ вновь возрастают, причём для максимального диаметра мешалки рост выражен сильнее. Это свидетельствует о более эффективной передаче механической энергии жидкости при увеличении диаметра мешалки [4, 10].

Так, средняя по объёму скорость диссипации энергии может быть использована как интегральный критерий сравнительной оценки интенсивности перемешивания при различных режимных и конструктивных параметрах волнового смесителя [6, 7].

Для качественной оценки пространственной структуры течения дополнительно выполнено трёхмерное численное моделирование. В отличие от двумерной постановки, трёхмерная модель позволяет проследить распределение линий тока по всему объёму аппарата и оценить степень вовлечения жидкости в движение.

На рисунке 4 показано пространственное распределение линий тока скорости в объёме жидкости. Полученные результаты свидетельствуют о формировании сложной трёхмерной структуры течения, охватывающей значительную часть рабочего объёма аппарата. Линии тока распространяются как в радиальном, так и в осевом направлениях, что указывает на образование объёмных вихревых структур [8, 9].

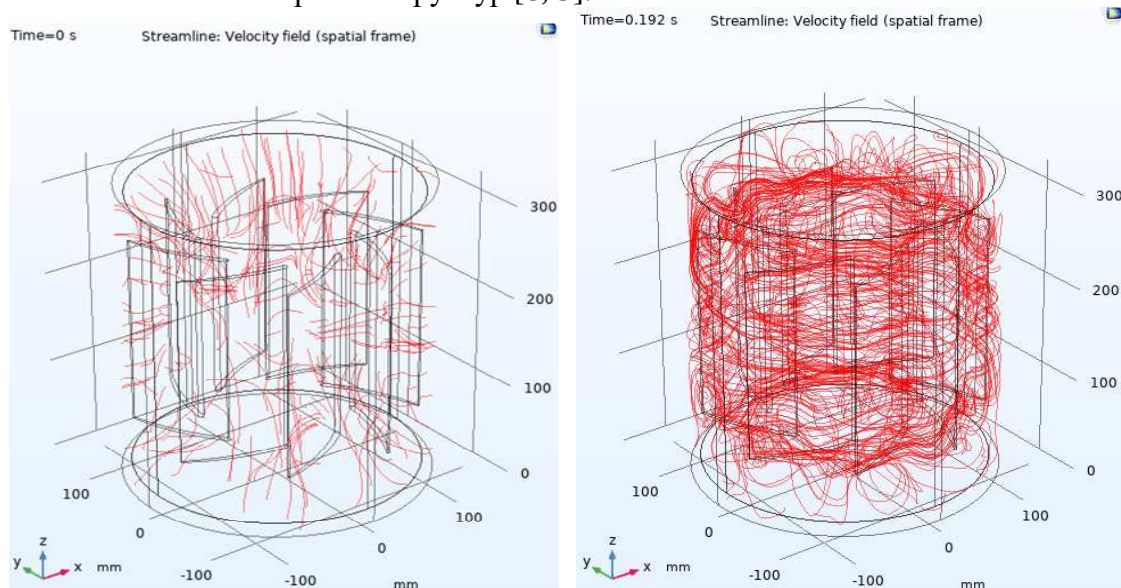


Рис. 4. Пространственное распределение линий тока скорости в объёме жидкости в лабораторном волновом смесителе

В отличие от традиционных аппаратов с вращающимися мешалками, в рассматриваемом смесителе не формируется устойчивое осевое или окружное вращение жидкости [2, 3]. Перемешивание обеспечивается наложением волновых и вихревых возмущений, распространяющихся от рабочих элементов и взаимодействующих между собой в объёме аппарата.

Так, трёхмерное моделирование подтверждает, что колебательное движение мешалки обеспечивает вовлечение в движение значительной части жидкости и снижает вероятность образования застойных зон.

Заключение

В работе выполнено численное исследование течения жидкости в аппарате волнового типа при колебательном движении мешалки. По результатам двумерного моделирования установлено, что в рабочей зоне аппарата формируется нестационарное поле скоростей с образованием волновых и вихревых структур, а интенсивность течения существенно зависит от частоты колебаний и диаметра мешалки.

Анализ средней по объёму скорости диссипации энергии показал, что увеличение частоты колебаний в целом приводит к росту интенсивности перемешивания, при этом максимальный диаметр мешалки обеспечивает более эффективную передачу механической энергии жидкости. Трёхмерное моделирование подтвердило пространственный характер течения и вовлечение в движение значительной части рабочего объёма аппарата.

Полученные результаты могут быть использованы при выборе режимных и конструктивных параметров волновых смесителей.

Список литературы

1. Бондаренко Н.А., Гусева Е.В., Сафаров Р.Р. Применение вычислительной гидродинамики для моделирования биореакторов с мешалкой в Ansys Fluent // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2023. – Т. 85, №2. – С. 123-129. – DOI: 10.20914/2310-1202-2023-2-123-129.
2. Мартыанов Е.И., Карпушкин С.В., Алексеев В.В. Оптимизация параметров механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2022. – №3. – С. 33-44. – DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2022/3/33-44.
3. Мартыанов Е.И., Малигин Е.Н. Математическое описание полей скоростей в аппарате с мешалкой // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2020. – №54(80). – С. 107-111. – DOI: 10.36807/1998-9849-2020-54-80-107-111.
4. Доманский И.В., Мильченко А.И., Некрасов В.А., Воробьев-Десятовский Н.В. Производительность осевых мешалок в смесителях с отражательными перегородками // Теоретические основы химической технологии. – 2020. – Т. 54, №1. – С. 97-104. – DOI: 10.31857/S0040357120010066.
5. Доманский И.В., Некрасов В.А. Особенности гидромеханического расчета аппарата с прецессирующей мешалкой // Теоретические основы химической технологии. – 2024. – Т. 58, №2. – С. 136-143. – DOI: 10.31857/S0040357124020011.
- 6-10. См. References

References

1. Bondarenko N.A., Guseva E.V., Safarov R.R. Application of computational fluid dynamics for simulation of stirred bioreactors in Ansys Fluent // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2023, vol. 85, no. 2, pp. 123-129. DOI: 10.20914/2310-1202-2023-2-123-129.
2. Mart'yanov E.I., Karpushkin S.V., Alekseev V.V. Optimization of parameters of mechanical mixing devices for vertical tank apparatuses // Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies. 2022, no. 3, pp. 33-44. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2022/3/33-44.
3. Mart'yanov E.I., Malygin E.N. Mathematical description of velocity fields in an apparatus with an impeller // Proceedings of Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University). 2020, no. 54(80), pp. 107-111. DOI: 10.36807/1998-9849-2020-54-80-107-111.
4. Domanskii I.V., Mil'chenko A.I., Nekrasov V.A., Vorob'ev-Desyatovskii N.V. Performance of axial impellers in mixers with baffles // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2020, vol. 54, no. 1, pp. 97-104. DOI: 10.31857/S0040357120010066.
5. Domanskii I.V., Nekrasov V.A. Features of hydromechanical calculation of an apparatus with a precessing mixer // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2024, vol. 58, no. 2, pp. 136-143. DOI: 10.31857/S0040357124020011.
6. Mortazavi H., Pakzad L. The Hydrodynamics and Mixing Performance in a Moving Baffle Oscillatory Baffled Reactor through Computational Fluid Dynamics (CFD) // Processes. 2020, vol. 8, no. 10, p. 1236. DOI: 10.3390/pr8101236.
7. Avila M., Kawas B., Fletcher D. F., Poux M., Xuereb C., Aubin J. Design, performance characterization and applications of continuous oscillatory baffled reactors // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2022, vol. 180, p. 108718. DOI: 10.1016/j.cep.2021.108718.
8. Mikhaylov K., Rigopoulos S., Papadakis G. Reconstruction of large-scale flow structures in a stirred tank from limited sensor data // AIChE Journal. 2021, vol. 67, no. 10, p. 17348. DOI: 10.1002/aic.17348.
9. Phusa T., Talaga J., Duda A., Duda P. Modeling mixing dynamics in uncovered baffled and unbaffled stirred tanks // AIChE Journal. 2021, vol. 67, no. 9, p. 17322. DOI: 10.1002/aic.17322.
10. Peng J., Sun W., Han H., Xie L., Xiao Y. Investigation of the Role of Impeller Structural Parameters on Liquid–Liquid Mixing Characteristics in Stirred Tanks // ACS Omega. 2022, vol. 7, no. 43, pp. 38700-38708. DOI: 10.1021/acsomega.2c04271.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Цыретаров Очир Жаргалович – инженер	Tsyretarov Ochir Zhargalovich – engineer
Веригин Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой мехатронных технологических комплексов	Verigin Aleksandr Nikolaevich – doctor of technical sciences, professor, head of the Department of mechatronic technological complexes
Коробчук Максим Васильевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры мехатронных технологических комплексов	Korobchuk Maksim Vasilievich – candidate of technical sciences, senior lecturer of the department of mechatronic technological complexes
tsyretarovochir@gmail.com	

Получена 26.03.2026