

УДК 628.2

© Ш. Юй, аспирант

© В. П. Верхотуров, канд. техн. наук

© Ю. А. Феофанов, д-р техн. наук, профессор

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: yshuaixian@mail.ru, wladw@mail.ru,

ufeofanov@rambler.ru

© Н. А. Черников, д-р техн. наук, профессор

(Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: nika_pgups@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-2-115-122

© S. Yu, post-graduate student

© V. P. Verkhoturov, PhD in Sci. Tech.

© Yu. A. Feofanov, Dr. Sci. Tech., Professor

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: yshuaixian@mail.ru, wladw@mail.ru,

ufeofanov@rambler.ru

© N. A. Chernikov, Dr. Sci. Tech., Professor

(Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia)

E-mail: nika_pgups@mail.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СМЕСИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ В СООРУЖЕНИЯХ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

EVALUATION OF MIXING CHAMBER EFFICIENCY IN WASTEWATER TREATMENT FACILITIES

Рассматривается математическое моделирование работы смесительных камер в сооружениях очистки сточных вод. На основе анализа различных методов смешивания реагентов, геометрических параметров камер была предложена конструкция смесительной камеры, предназначенной для применения в системах очистки сточных вод целлюлозно-бумажного производства. В программе ANSYS FLUENT была разработана модель движения жидкости в смесительной камере с целью определения оптимального расстояния между перегородками. Полученные результаты демонстрируют, что наилучшее смешивание наблюдается при расстоянии между перегородками 100 мм, а процесс характеризуется равномерным распределением реагента внутри камеры. Данная конструкция камеры позволяет улучшить смешивание реагента с водой и повысить эффективность работы сооружения очистки в целом. Результаты исследования могут быть использованы в практической деятельности в качестве рекомендаций при разработке комплексных очистных сооружений.

Ключевые слова: смешивание, смесительные камеры, моделирование ANSYS FLUENT, очистка сточных вод, целлюлозно-бумажные сточные воды.

The article discusses the mathematical modeling of mixing chambers' performance at wastewater treatment plants. Based on an analysis of various methods for mixing reagents and the geometrical parameters of chambers, there is proposed a mixing chamber design suitable for pulp and paper wastewater treatment systems. In order to determine the optimum distance between the baffles, using the ANSYS FLUENT program, there was developed a model of the fluid motion in the mixing chamber. The results obtained indicate that the best mixing occurs at a distance between the baffles of 100 mm, the process being characterized by a uniform distribution of the reagent within the chamber. This chamber design allows for better mixing of the reagent with water and improves the efficiency of the treatment plant as a whole. The findings of this study can serve as practical recommendations for developing integrated treatment facilities.

Keywords: mixing, mixing chambers, ANSYS FLUENT modeling, wastewater treatment, pulp and paper wastewater.

Введение

В технологических процессах водоочистки, особенно при реализации методов химического окисления, значительную роль

играет эффективное смешивание реагентов со сточными водами. Этот процесс влияет на селективность, скорость и молекулярно-массовое распределение реагента, что,

в свою очередь, непосредственно сказывается на результатах очистки сточных вод. Процесс смешивания многофазных жидкостей в турбулентных условиях, характеризуемых высокими числами Рейнольдса, зависит от множества факторов. Эффективность смешивания определяется не только физическими свойствами жидкостей (такими как плотность и вязкость), но и конструктивными особенностями смесительных устройств, определяющими основные режимы процесса, и размерами химической смесительной камеры.

При очистке сточных вод с высокой концентрацией загрязнений неправильное смешивание реагента может привести к процессам преждевременной агрегации и образованию частиц с различными характеристиками (например, размером частиц), обусловленными пространственной неоднородностью распределения реагента в смесительной камере. В связи с этим важно рассмотреть процесс смешивания с учетом геометрических и гидравлических параметров смесительной камеры.

В работе [1] было рассмотрено воздействие различных методов смешивания на кинетику химических реакций. В частности, был проанализирован эффект смешивания в T - и Y -образных тройниках и при поворотах труб под углом 90 градусов. Путем численного моделирования методом *CFD* было проведено качественное сравнение эффективности их использования. В работе [2] было изучено воздействие непрерывных многокамерных систем на эффективность смешивания. В рамках данного исследования была введена величина энергии смешивания на единицу объема. Несмотря на то что оценка эффективности смешивания проводилась с использованием численного моделирования *CFD*, следует отметить, что данная методика не всегда может обеспечить адекватную оценку параметров в крупномасштабных задачах из-за значительной погрешности. В ра-

боте [3] представлены результаты исследований характеристик микросмесителей с вогнутой и выпуклой смесительной камерой. Введено понятие индекса смешивания, полученного с учетом смешивания жидкостей при различных числах Рейнольдса, а также проведена оптимизация конструкции смесителя с целью повышения его эффективности. В работе [4] была представлена конструкция вихревого реактора-смесителя, способного создавать гидродинамическую рециркуляцию внутри камеры для усиления эффекта смешивания. Предложенная конструкция смесительной камеры позволяет достигнуть заданного эффекта без использования механического привода, что является очевидным преимуществом по сравнению с аналогичными устройствами, представленными в работах [5, 6]. Следует отметить, что проблема обеспечения стабильного и эффективного смешивания многофазных жидкостей остается актуальной во многих областях хозяйственной деятельности и требует дополнительных исследований.

В данной работе представлены результаты математического моделирования смесительной камеры, основанной на принципе циркуляции жидкости в межполочном пространстве. Конструкция камеры представляет собой цилиндрический корпус с наклонными пластинами внутри, имеющий входное отверстие для подачи сточных вод совместно с химическим реагентом. Камера располагается в цилиндрической емкости (рис. 1). Через кольцевое пространство между камерой и внешним корпусом производится отведение перемешанного с реагентом потока сточных вод. В нижней части смесительной камеры расположен бункер с наклонными стенками, облегчающий накопление и выгрузку образовавшегося осадка.

Цилиндрическая конструкция смесительной камеры имеет диаметр $D = 2$ м и высоту $H = 4$ м. Для подвода сточных вод в верхней части камеры подключена труба диаметром

$d = 0,3$ м. Добавление реагента (перекиси водорода) осуществляется с помощью трубки диаметром $d_m = 0,075$ м, подведенной к шельге трубопровода подачи сточных вод. После прохождения камеры смешивания поток воды поворачивает и попадает в зону камеры реакции, диаметр которой составляет $D_p = 1,5$ м. При моделировании режимов работы камеры расстояние s между перегородками в камере принималось равным 100, 200 и 600 мм.

Устройство наклонных пластин в смешивающей камере обеспечивает возникновение вихревых зон повышенной турбулентности, что позволяет увеличить эффективность перемешивания реагента. Поток сточных вод с химическим реагентом внутри камеры движется сверху вниз. После прохождения через смесительную камеру поток воды попадает в зону химической реакции, где движется снизу вверх, находясь в зазоре между камерой и реактором. Данная конструкция камеры проста и не требует механического привода, занимает небольшую площадь и может объединяться с другими сооружениями очистки сточных вод в комплексное очистное сооружение.

Методы

Промышленные сточные воды несут в себе разнообразные вредные компоненты и химические соединения, включая тяжелые металлы, органические вещества и другие загрязнители. По сравнению с городскими сточными водами промышленные сточные воды обычно более сложны в обработке из-за их комплексного состава и высокой концентрации загрязняющих веществ, что требует использования более сложных методов очистки.

Рассмотренная выше конструкция смесительной камеры предполагается к использованию при очистке сточных вод целлюлозно-бумажного производства. Стоки данного производства содержат органические соединения, такие как дибутилфталат и диметилсульфид. Эти соединения могут подвергаться окислению с использованием химических реагентов, в частности перекиси водорода, что приводит к образованию диоксида углерода и воды [7]. При проведении исследований в качестве реагента использовался 30-процентный раствор перекиси водорода. При определении дозы перекиси водорода, необходимой для окисления органических

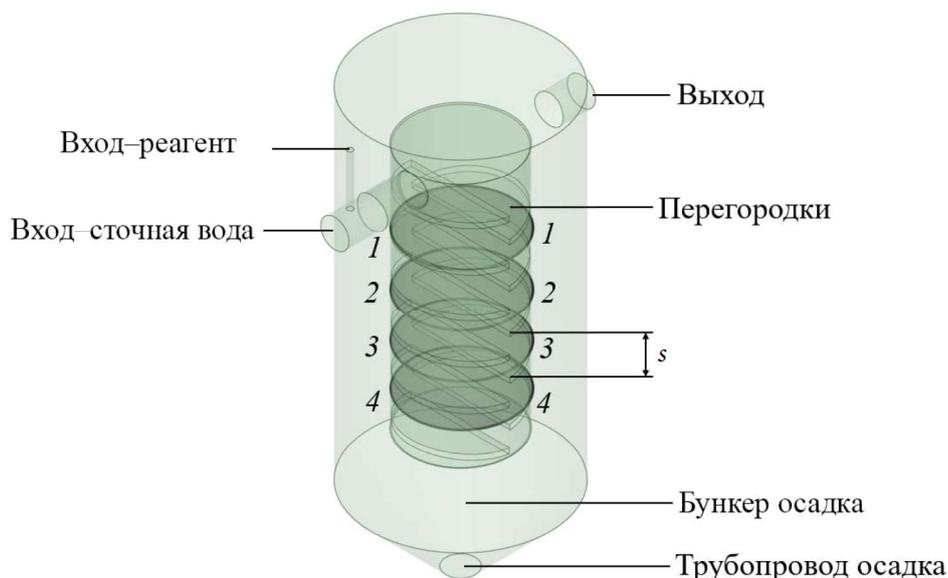


Рис. 1. Конструкция смесительной камеры

загрязнений, были использованы данные работы [8], в соответствии с которыми молярное соотношение составляет 1 : 14,88.

Процесс смешивания жидкостей внутри реактора представляет собой двухфазное течение потока воды и перекиси водорода. Предполагается, что жидкая фаза сточных вод и перекиси водорода является несжимаемой.

Для точного моделирования турбулентного режима потока сточных вод и перекиси водорода внутри камеры смешивания и вычисления характеристик течения использовалась модель *VOF (Volume of Fluid)* в программе конечно-элементного анализа *ANSYS FLUENT* [9], а учет турбулентности обеспечивался применением стандартной модели турбулентности $k - \varepsilon$.

В качестве основной фазы выступала вода, для нее плотность задавалась равной $998,2 \text{ кг/м}^3$. Для 30-процентного раствора перекиси водорода плотность задавалась 1110 кг/м^3 . Для воды кинематическая вязкость $\nu = 0,97 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Для 30-процентного раствора перекиси водорода в воде коэффициент диффузии составляет $D = 2,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, а кинематическая вязкость $\nu = 1,11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Процесс теплообмена между средами не моделировался. Также при настройке модели была учтена сила гравитации.

Для входа сточной воды и реагента были установлены скорости $0,8\text{--}2 \text{ м/с}$, а на выходе — атмосферное давление. Решение было получено с применением алгоритма *SIMPLE* [10].

Все поверхности в расчетной области обладают граничными условиями без скольжения. В качестве материала стенок принимался полиэтилен высокой плотности с шероховатостью стенок $0,009 \text{ мкм}$.

Для генерации расчетной сетки использовалось программное обеспечение *Meshing*. С целью обеспечения требуемой точности и сходимости решения, а также сокращения

времени расчета задачи размер ячейки расчетной сетки для всей смешивательной камеры составлял 10 мм . В зоне контакта потока воды с твердыми стенками смешивательной камеры осуществлялось дополнительное умельчение сетки для обеспечения требований по моделированию пограничного слоя. В области пограничного слоя размер ячейки принимался равным $1,5 \text{ мм}$.

Для настройки модели в начальный момент времени $t = 0$ предполагалось, что внутренняя полость сооружения заполнена воздухом. В процессе дальнейшего моделирования осуществлялась подача воды и перекиси водорода внутрь модели. По истечении некоторого времени в сооружении наступало установившееся движение потока.

Для математического моделирования поля скорости и давления потока использовалась система уравнений неразрывности и Навье–Стокса, которая имеет следующий вид:

$$\left(\vec{u} \cdot \nabla \right) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u}; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0. \quad (2)$$

Для моделирования процесса смешивания двух жидкостей выполнялось решение уравнения диффузии:

$$\left(\vec{u} \cdot \nabla \right) \phi = D \nabla^2 \phi, \quad (3)$$

где D — коэффициент диффузии; ϕ — объемная доля реагента.

Для решения указанных уравнений использовался неявный метод решения уравнений Навье–Стокса [11].

Величина шага по времени принималась равной $0,01 \text{ с}$. В процессе расчета были достигнуты требуемые значения невязок по моделируемым величинам скорости, давления, объемной доли веществ, характеристикам турбулентности, подтверждающие сходимость задачи.

Результаты

Для проведения анализа процесса смешивания был построен вертикальный график

вдоль вертикальной оси камеры смешивания, который отображает распределение концентрации смешиваемых жидкостей внутри камеры. На трубопроводе подачи объемная доля реагента была задана $\varphi = 1$, а на входе сточных вод — $\varphi = 0$ [12]. При значении $\varphi = 0,5$ считается, что сточные воды полностью смешиваются с реагентом.

На рис. 2 представлено сравнение процесса смешивания для трех вариантов камеры с различными расстояниями s между перегородками при одинаковой входной скорости потока 0,8 м/с. На графиках видно, что эффективность перемешивания реагента с водой в значительной мере зависит от расстояния s между перегородками. Увеличение этого расстояния оказывает негативное влияние на эффективность смешивания, приводя к росту размера циркуляционных зон, где наблюдается снижение скорости движения потока воды и недостаточное смешивание.

Численное моделирование подтвердило необходимость и научную обоснованность определения частоты установки перегородок в смесительной камере. В работе была рассмотрена оптимизация расстояния между перегородками при различных режимах потока с целью повышения эффективности

смешивания пероксида водорода и улучшения очистки сточных вод.

В данном исследовании по высоте смесительной камеры были выделены четыре характерных сечения, отмеченные значительными изменениями степени смешивания (см. рис. 1), обозначенные как 1–1, 2–2, 3–3 и 4–4. Эти сечения служат для количественной оценки эффективности перемешивания реагента с водой.

На рис. 3 представлены результаты оценки степени смешивания для каждого сечения при различных скоростях потока сточных вод. На графиках видно, что независимо от входной скорости потока, на выходе из смесительной камеры степень смешивания сточных вод с перекисью водорода превышает 70 %, а в случае расстояния между перегородками $s = 100$ мм достигается полное перемешивание. При скорости потока $V = 0,8$ м/с смешивание для всех трех конструкций увеличивается постепенно. Для расстояния между перегородками $s = 600$ мм в сечении 4–4 коэффициент смешивания составляет лишь 70 %.

При скоростях свыше 0,8 м/с также наблюдается тенденция к увеличению коэффициента смешивания для всех трех вариантов установки перегородок. При расстояниях

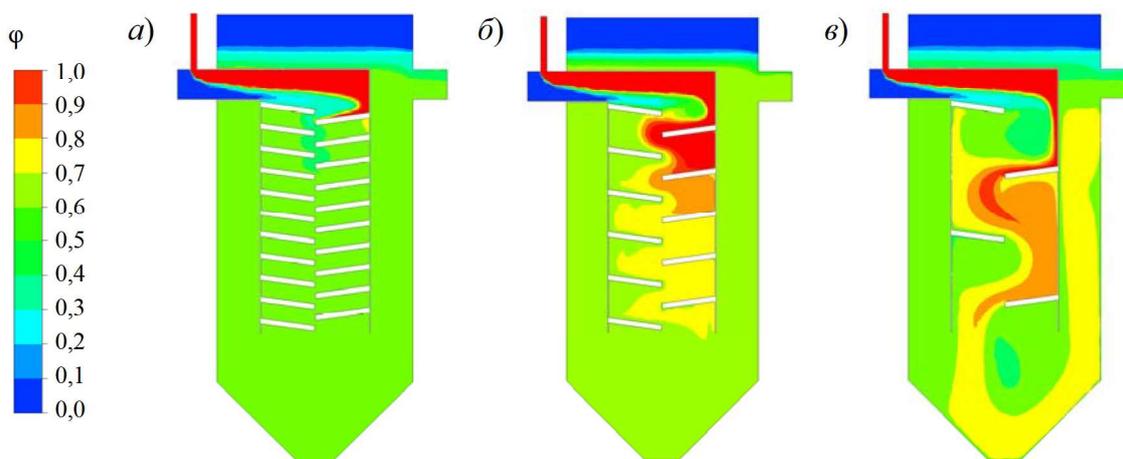


Рис. 2. Распределение объемной доли смешиваемых жидкостей в смесительной камере с разным расстоянием между перегородками: а — $s = 100$ мм; б — $s = 200$ мм; в — $s = 600$ мм

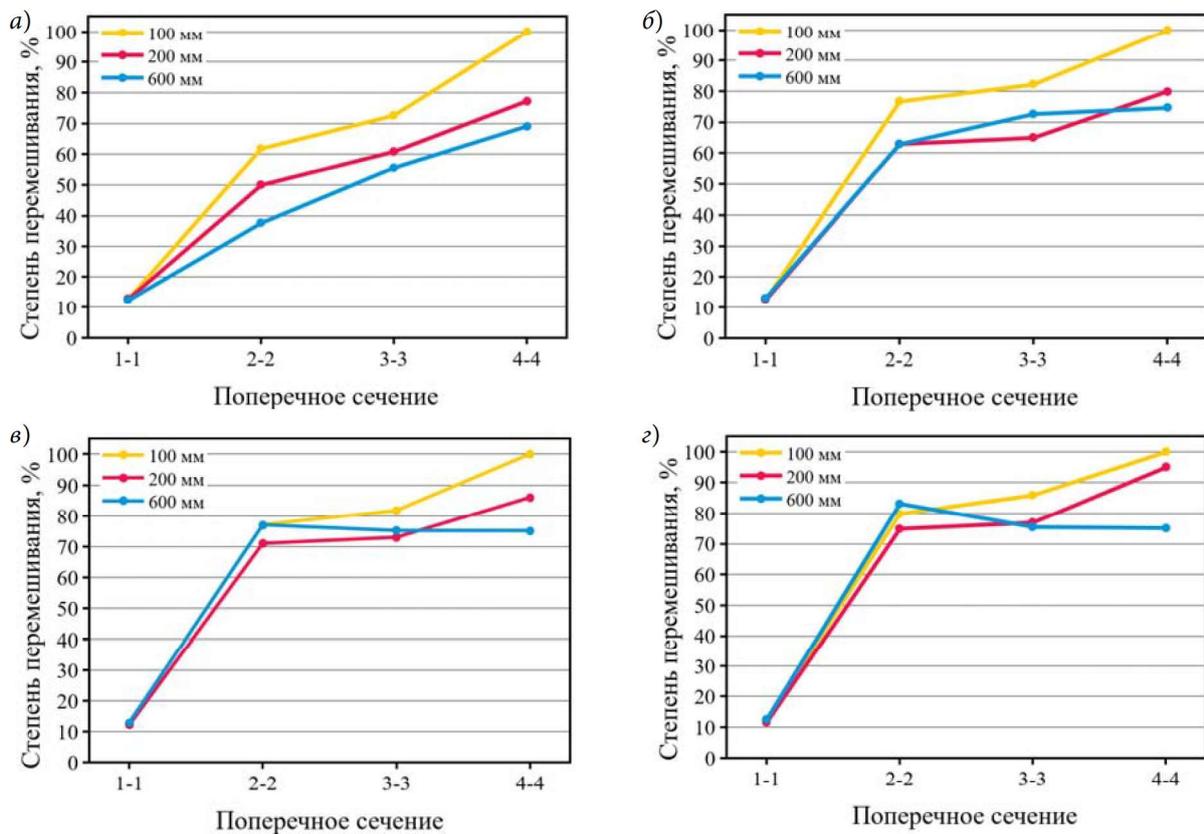


Рис. 3. Зависимость степени перемешивания от скорости входного потока и расстояния между перегородками: а — $v = 0,8$ м/с; б — $v = 1,2$ м/с; в — $v = 1,6$ м/с; з — $v = 2,0$ м/с

между перегородками $s = 100$ мм и 200 мм демонстрируются схожие итоговые характеристики. Однако во всех сечениях коэффициент смешивания при $s = 100$ мм был неизменно выше, чем при $s = 200$ мм.

Увеличение расстояния между пластинами вызывает снижение интенсивности перемешивания и, как результат, снижение эффективности очистки.

Выводы

С использованием численного моделирования были изучены параметры процесса смешивания реагента со сточной водой. Полученные результаты показывают, что расстояние между перегородками в 100 мм обеспечивает полное перемешивание и равномерное распределение перекиси водорода, что повышает эффективность процесса окисления при увеличении скорости входного потока. Проведенное численное моделирование

подтверждает эффективность использования перегородок и необходимость оптимизации расстояния между ними в зависимости от величины подаваемого расхода воды и заданного коэффициента смешивания. Предложенная конструкция отличается простотой и компактностью, не требует механического привода, что способствует ее интеграции в комплексные системы очистки сточных вод. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего совершенствования и оптимизации систем очистки сточных вод целлюлозно-бумажных производств.

Библиографический список

1. Bertrand M., Plasari E., Baron P. Methods for the characterization and comparison of mixing efficiency of different confined opposing jet mixing devices // 12th European Conference on Mixing. Bologna, Italy. 2006. URL: <https://cea.hal.science/cea-02355395/> (дата обращения: 01.12.2024).

2. Jin W., Chen S., Xie Z., Wei Z., Qin N. Influence of the process parameters of a multi-chamber continuous mixing equipment on the mixing energy // *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)*. 2023. Vol. 50 (3). Pp. 109–117. DOI 10.13543/j.bhxbzr.2023.03.013.
3. Gidde R. R. Concave wall-based mixing chambers and convex wall-based constriction channel micromixers // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2021. Vol. 101 (4). Pp. 561–583. DOI 10.1080/03067319.2019.1669585.
4. Ma Y., Li G., Li W. Simulation and optimization of cyclonic mixing reactor based on Fluent // *China Petroleum Machinery*. 2021. Vol. 49 (3). Pp. 111–116. DOI 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2021.03.017.
5. Zhang Z., Zheng Y., Xu X., Peng B. The Effect of Mixing Chamber Configuration and Submersion Depth on Centrifugal Aerator Performance // *Sustainability*. 2022. Vol. 14 (18). 11355. DOI 10.3390/su141811355.
6. Gu D., Xu H., Ye M., Wen L. Design of impeller blades for intensification on fluid mixing process in a stirred tank // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2022. Vol. 138. 104475. DOI 10.1016/j.jtice.2022.104475.
7. Ziembowicz S., Kida M., Koszelnik P. The use of alternative catalysts in processes of the chemical degradation of di-n-butyl phthalate in aqueous solutions // *Chemosphere*. 2019. Vol. 237. 124450. DOI 10.1016/j.chemosphere.2019.124450.
8. Qiu S., Li X., Yang F., Wei L. Treatment of DBP wastewater by Fenton reagent-aerobic activated sludge process // *Environmental Protection of Chemical Industry*. 2017. Vol. 37 (4). Pp. 433–436. DOI 10.3969/j.issn.1006-1878.2017.04.011.
9. Nichita B. A., Zun I., Thome J. R. A VOF method coupled with a dynamic contact angle model for simulation of two-phase flows with partial wetting // *7th International Conference on Multiphase Flow*. Tampa, Florida, May 30 – June 4, 2010. URL: <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/fe208cc4-cb4a-48c5-b64f-f45040cb6c25> (дата обращения: 01.12.2024).
10. Jeong W., Seong J. Comparison of effects on technical variances of computational fluid dynamics (CFD) software based on finite element and finite volume methods // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2014. Vol. 78. Pp. 19–26. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2013.10.017.
11. Bristeau M. O., Glowinski R., Periaux J. Numerical methods for the Navier-Stokes equations. Applications to the simulation of compressible and incompressible viscous flows // *Computer Physics Reports*. 1987. Vol. 6 (1–6). Pp. 73–187. DOI 10.1016/0167-7977(87)90011-6.
12. Juraeva M., Kang D.-J. Design and Mixing Analysis of a Passive Micromixer with Circulation Promoters // *Micromachines*. 2024. Vol. 15 (7). 831. DOI 10.3390/mi15070831.

References

1. Bertrand M., Plasari E., Baron P. Methods for the characterization and comparison of mixing efficiency of different confined opposing jet mixing devices. *Proceedings of the 12-th European Conference on Mixing*. Bologna, Italy. 2006. Available at: <https://cea.hal.science/cea-02355395/> (accessed: 01.12.2024).
2. Jin W., Chen S., Xie Z., Wei Z., Qin N. Influence of the process parameters of the multi-chamber continuous mixing equipment on the mixing energy. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)*, 2023, vol. 50 (3), pp. 109–117. DOI 10.13543/j.bhxbzr.2023.03.013
3. Gidde R. R. Concave wall-based mixing chambers and convex wall-based constriction channel micromixers. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2021, vol. 101 (4), pp. 561–583. DOI 10.1080/03067319.2019.1669585.
4. Ma Y., Li G., Li W. Simulation and optimization of cyclonic mixing reactor based on Fluent. *China Petroleum Machinery*, 2021, vol. 49 (3), pp. 111–116. DOI 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2021.03.017.
5. Zhang Z., Zheng Y., Xu X., Peng B. The Effect of Mixing Chamber Configuration and Submersion Depth on Centrifugal Aerator Performance. *Sustainability*, 2022, vol. 14 (18), 11355. DOI 10.3390/su141811355
6. Gu D., Xu H., Ye M., Wen L. Design of impeller blades for intensification on fluid mixing process in a stirred tank. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2022, vol. 138, 104475. DOI 10.1016/j.jtice.2022.104475
7. Ziembowicz S., Kida M., Koszelnik P. The use of alternative catalysts in processes of the chemical degradation of di-n-butyl phthalate in aqueous solutions. *Chemosphere*, 2019, vol. 237, 124450. DOI 10.1016/j.chemosphere.2019.124450
8. Qiu S., Li X., Yang F., Wei L. Treatment of DBP wastewater by Fenton reagent-aerobic activated sludge process. *Environmental Protection of Chemical Industry*. 2017, vol. 37 (4), pp. 433–436. DOI 10.3969/j.issn.1006-1878.2017.04.011.
9. Nichita B. A., Zun I., Thome J. R. A VOF method coupled with a dynamic contact angle model for simulation of two-phase flows with partial wetting. *Proceedings of the 7-th International Conference on Multiphase Flow*. Tampa, Florida, May 30 – June 4, 2010. Available at: <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/fe208cc4-cb4a-48c5-b64f-f45040cb6c25> (accessed: 01.12.2024).
10. Jeong W., Seong J. Comparison of effects on technical variances of computational fluid dynamics (CFD) software based on finite element and finite volume methods.

International Journal of Mechanical Sciences, 2014, vol. 78, pp. 19–26. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2013.10.017

11. Bristeau M. O., Glowinski R., Periaux J. Numerical methods for the Navier-Stokes equations. Applications to the simulation of compressible and incompressible viscous

flows. *Computer Physics Reports*, 1987, vol. 6 (1–6), pp. 73–187. DOI 10.1016/0167-7977(87)90011-6.

12. Juraeva M., Kang D.-J. Design and Mixing Analysis of a Passive Micromixer with Circulation Promoters. *Micromachines*, 2024, vol. 15 (7), 831. DOI 10.3390/mi15070831.