

УДК 628.2

© Ш. Юй, аспирант

© В. П. Верхотуров, канд. техн. наук, ст. преподаватель

© В. М. Васильев, д-р техн. наук, профессор

© 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, 89119311522@bk.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 10.23968/1999-5571-2024-21-2-118-124

© S. Yu, post-graduate student

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

© V. M. Vasiliev, Dr. Sci. Tech., Professor

© Y. 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, 89119311522@bk.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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СМЕСИТЕЛЬНЫХ КАМЕР ЛОКАЛЬНЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

IMPROVING THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF THE MIXING CHAMBERS OF LOCAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS

Рассмотрены вопросы моделирования процессов смешения реагента в смесительных камерах различных конструкций. Представлены конструктивные особенности смесительных камер, оборудованных поперечными пластинами, и приведена оценка изменения эффективности процесса. Моделирование выполнялось в программе конечно-элементного анализа ANSYS FLUENT. Проведенные исследования показывают перспективность использования предлагаемой конструкции смесительной камеры с поперечными перегородками в практике проектирования комплексных очистных сооружений для очистки сточных вод предприятий целлюлозно-бумажной промышленности.

Ключевые слова: процесс смешения, смесительная камера, реагент, очистка сточных вод, моделирование Ansys Fluent.

The article considers the issues of modeling the processes of the reagent mixing in mixing chambers of various designs. The design features of mixing chambers equipped with transverse plates are presented and an assessment of the change in the efficiency of the process is given. The simulation was performed in the ANSYS FLUENT finite element analysis program. The implemented research shows the prospects of using the proposed design of a mixing chamber with transverse partitions in the practice of designing integrated wastewater treatment plants for pulp and paper industry enterprises.

Keywords: process of mixing, mixing chamber, reagent, wastewater treatment, Ansys Fluent modeling.

Введение

В промышленных сточных водах различных производств может содержаться значительное количество органических примесей, представляющих серьезную угрозу для окружающей природной среды. Например, в стоках предприятий целлюлозно-бумажной промышленности могут содержаться дибутилфталат и диметилсульфид, которые

плохо извлекаются при очистке и могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду. [1]. Такие воды не могут быть напрямую направлены на очистную станцию для совместной очистки с другими категориями сточных вод и обычно требуют предварительной обработки, которая предусматривает применение химических реагентов, обеспечивающих окисление стойких

органических соединений. В качестве окисляющих реагентов могут быть использованы такие вещества, как озон, хлор и перекись водорода [2]. Подобные методы химической обработки позволяют эффективно улучшать качество очистки и достигать требуемых показателей, обеспечивающих возможность сброса сточных вод в централизованные системы водоотведения или повторного использования в оборотных системах предприятия.

Результативность метода обработки химическим реагентом и протекание окислительной реакции напрямую зависит от эффективности смешивания реагента с загрязненными сточными водами. Увеличение степени смешивания двух фаз приводит к увеличению вероятности молекулярных столкновений в единице объема, что, в свою очередь, увеличивает скорость химической реакции [3]. Таким образом, можно отметить, что обеспечение требуемой степени смешения реагента со сточными водами в ограниченных временных и пространственных условиях является актуальной задачей при разработке комплексных очистных сооружений.

Чтобы достичь более эффективного смешивания, важно правильно спроектировать геометрию смесительной камеры. В данной статье рассматривается работа двух вариантов конструкции химической смесительной камеры (рис. 1). Первый вариант (рис. 1, а) с поперечными пластинами позволяет улучшить перемешивание за счет создания дополнительных вихревых потоков и турбулентности. Это приводит к более интенсивному контакту между реагентом и сточной водой, что способствует более эффективному смешению и повышению реакционной эффективности. Второй вариант (рис. 1, б) имеет более простую геометрию без пластин, в которой поток перемешивается за счет поворота и циркуляции в цилиндрическом пространстве камеры.

С целью удаления дибутилфталата и диметилсульфида из сточных вод целлюлозно-бумажного производства в рамках настоящего исследования предлагается использование раствора перекиси водорода в качестве реагента [4]. Расход сточных вод составлял $Q = 13,9$ л/с. С учетом концентрации дибутилфталата $C_1 = 50$ мг/л и диметилсульфида $C_2 = 50$ мг/л в реальных сточных водах, установленных на основании источника [5], был принят расход реагента $q_p = 0,6$ л/с.

Цилиндрическая конструкция смесительной камеры диаметром $D = 2$ м и высотой $H = 4$ м занимает небольшую площадь и может легко интегрироваться в технологическую схему с другими видами очистки при проектировании комплексного сооружения по очистке сточных вод (см. рис. 1). Движение воды в камере осуществляется сверху вниз. Для подвода сточной воды к верхней части камеры обеспечивается подключение трубопровода диаметром $d = 0,3$ м. Инъектирование перекиси водорода осуществляется с помощью трубки диаметром

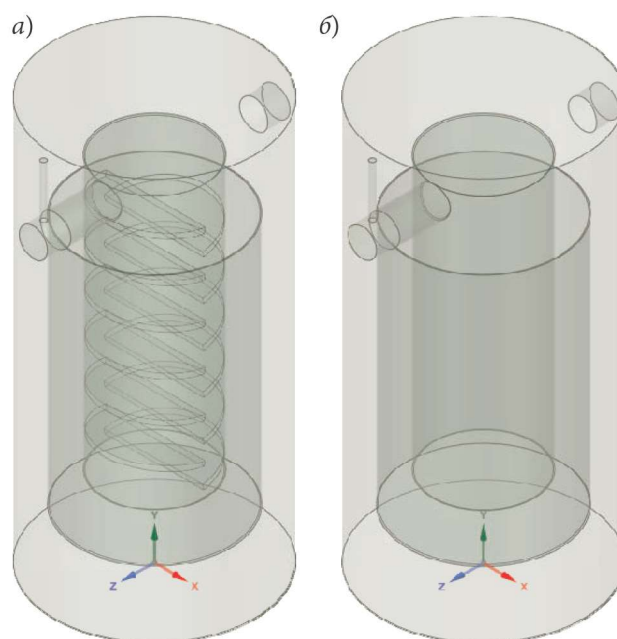


Рис. 1. Геометрическая модель смесительной камеры: а — с поперечными стенками; б — без поперечных стенок

$d_i = 0,075$ м, подключаемой к шельге подводящего трубопровода. После камеры смешения поток воды-разворачивается и попадает в камеру протекания химической реакции, диаметр которой $D_p = 1,5$ м. Таким образом, окисление органических соединений протекало в межкорпусном пространстве между смесительной камерой и камерой реакции, сопряженными в виде конструкции «стакан в стакане».

В исследовании применялось математическое моделирование с использованием программы конечно-элементного анализа ANSYS FLUENT. Такой подход позволяет с минимальными затратами оценить эффективность предлагаемых технологических решений и выполнить прогноз работы очистного сооружения. На сегодняшний день подобное моделирование повсеместно применяется в различных областях науки и техники, в том числе и в сфере водоснабжения и водоотведения для анализа гидравлических характеристик работы сетей и сооружений [6–10].

Методы

С помощью ANSYS FLUENT выполнялось моделирование движения потока воды в представленных конструкциях смесительной камеры с целью получения поля скорости и давлений в расчетной области. Также в поток воды осуществлялось инъецирование перекиси водорода с целью получения поля объемной доли реагента и оценки положения сечения полного перемешивания воды и перекиси.

Для расчета процесса смешения двух различных жидкостей в расчетной области использовалась модель VOF (volume of fluid) [11]. В модели предусмотрено присутствие воздуха, воды и перекиси водорода. В качестве основной фазы выступает вода, для нее плотность задана равной $998,2$ кг/м³, для воздуха и 30-процентного раствора перекиси соответственно $1,225$ кг/м³ и 1110 кг/м³. Процесс теплообмена между средами не учи-

тывался. Движение сред протекало при постоянной температуре 25 °С.

Процесс смешения рассматривался в рамках нестационарной задачи. Общее время расчета составило $T = 50$ с. Шаг по времени принимался равным $t = 0,01$ с.

С целью обеспечения требуемой точности расчета и сходимости задачи размер ячейки расчетной сетки для всей смесительной камеры составлял 10 мм. В зоне контакта потока воды с твердыми стенками смесительной камеры осуществлялось дополнительное уменьшение ячеек сетки для обеспечения условий моделирования пограничного слоя. В пограничном слое размер ячейки уменьшался до величины $1,5$ мм.

Поскольку в реальных условиях поток в смесительной камере движется за счет влияния силы тяжести, в настройках модели был учтен эффект гравитации. Для этого в вертикальном направлении устанавливалось значение ускорения свободного падения, равное $9,81$ м/с².

На рис. 2 показаны граничные условия модели. Для обеспечения входа потока воды в расчетную область на торце подводящего трубопровода устанавливалось условие *Inlet*, которое задавалось через скорость потока, принятую равной $V_{H_2O} = 1$ м/с. Объемная доля воды соответствовала 1. Для моделирования инъецирования перекиси на торце малой трубки также задавалось условие *Inlet*. Скорость входного потока принималась равной $V_{H_2O_2} = 0,5$ м/с, а объемная доля 1 в данном случае задавалась для перекиси.

Для выхода потока смеси воды и перекиси из расчетной области сооружения на торце отводящего трубопровода предусмотрено условие *Outlet*. На выходном условии указывается значение избыточного давления $P_m = 0$ Па, что соответствует истечению потока в окружающую среду с атмосферным давлением.

Все остальные поверхности расчетной области предполагаются непроницаемыми

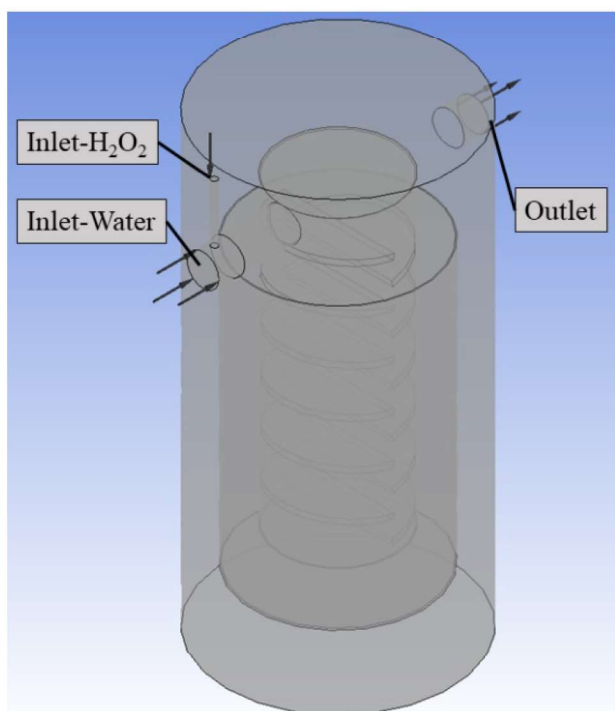


Рис. 2. Граничные условия

стенками. Для них выбирается граничное условие *Wall*, материал — полиэтилен высокой плотности, с указанием коэффициента шероховатости 0,009 мкм.

В начальный момент времени сооружение заполнено воздухом. В процессе модели-

рования камера заполняется потоком воды, в который добавляется реагент. За время моделирования движение становится установившимся.

В процессе расчета достигнуты требуемые значения невязок по моделируемым величинам скорости, давления, объемной доли веществ, характеристикам турбулентности, свидетельствующие о сходимости задачи.

Результаты

На рис. 3 представлены результаты моделирования объемной доли перекиси водорода в расчетной области камеры. Для анализа сделано вертикальное сечение в центральной части сооружения по оси подводящего и отводящего трубопровода. Полученные данные отражают ожидаемый результат, смешительная камера с поперечными пластинами имеет заметно более высокий коэффициент смешивания по сравнению с камерой без пластин. Следует отметить, что при прохождении потока через область с поперечной стенкой происходит увеличение степени турбулизации (рис. 4), что приводит к равномерному распределению концентрации реагента по сечению камеры, в то время как в конструкции без поперечных пластин на-

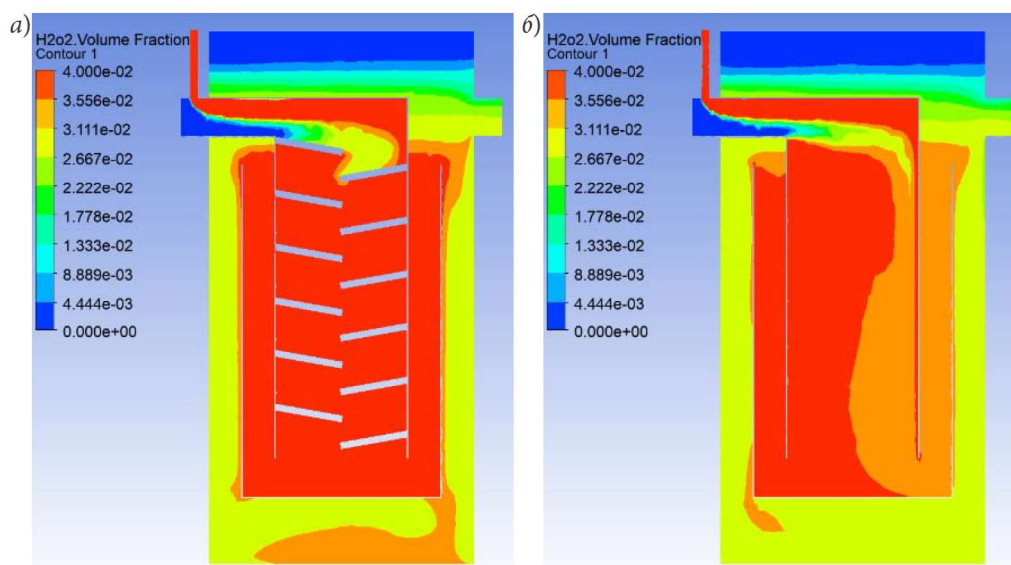


Рис. 3. Объемная доля H₂O₂ в смешительной камере: а — с поперечными пластинами; б — без поперечных пластин

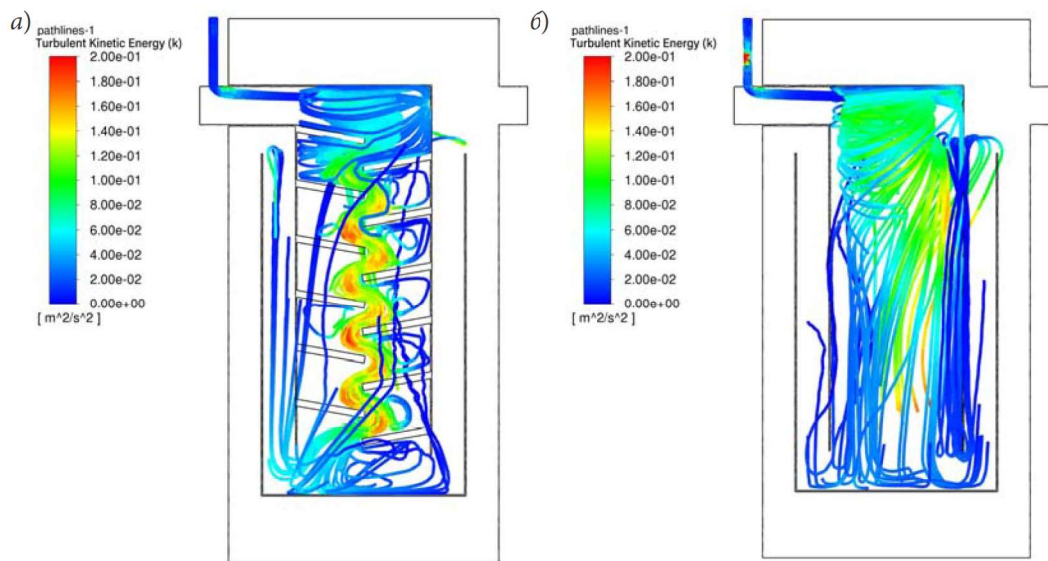


Рис. 4. Величина турбулентной кинетической энергии в смесительной камере:
 а — с поперечными пластинами; б — без поперечных пластин

блюдается тенденция к увеличению концентрации реагента справа налево по причине образования большой зоны циркуляции в этой области, что сказывается на степени смешения.

Также в работе производилась оценка изменения степени смешения воды и перекиси водорода с течением времени (рис. 5). Для этого выбиралось контрольное сечение, где поток выходит из смесительной камеры и поворачивает в камеру химической реакции. С течением времени степень смешения

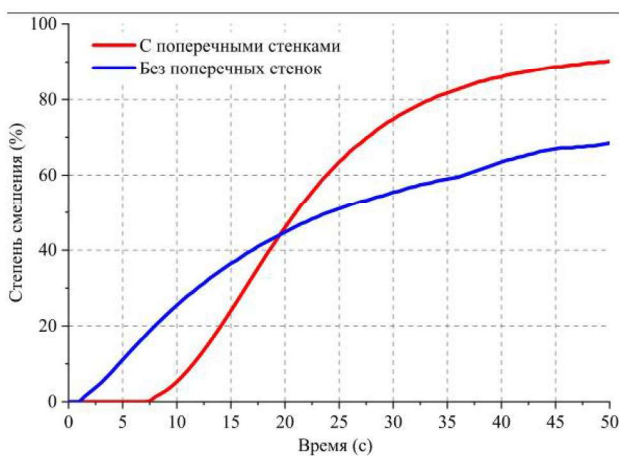


Рис. 5. График зависимости степени смешения потока воды и реагента от времени

в обеих конструкциях смесительной камеры увеличивается. После наступления установившегося движения кратность перемешивания в смесительной камере становится постоянной. В случае конструкции камеры с поперечными пластинами степень смешения потока с реагентом больше на 21,75 % по сравнению с камерой, в которой отсутствуют пластины. Полученные результаты расчета согласуются с ожиданиями и качественно отражают исследуемый процесс.

Для более детального анализа процесса движения потока внутри смесительной камеры представлено поле скорости (рис. 6) и график изменения средней скорости потока по высоте сооружения (рис. 7). В случае камеры без пластин наблюдается сильная неравномерность скорости как по живому сечению потока, так и по высоте камеры. По ширине потока в сечении на выходе из камеры смешения скорость изменяется в диапазоне от 0,003 до 0,300 м/с, а по вертикали камеры — в диапазоне от 0,130 до 0,220 м/с. Неравномерность скорости приводит к различным условиям перемешивания, в результате чего часть потока в меньшей степени контактирует с реагентом. В камере с по-

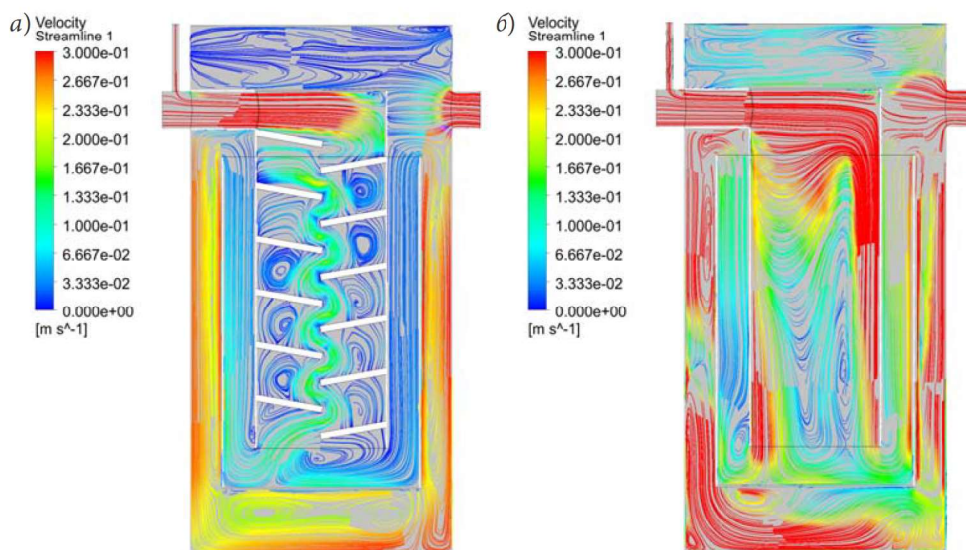


Рис. 6. Поле скорости в смесительной камере: а — с поперечными стенками; б — без поперечных стенок

перечными пластинами, напротив, скорость потока в меньшей степени изменяется в аналогичных областях. В живом сечении потока на выходе из камеры смешения диапазон изменения скорости — от 0,003 до 0,130 м/с, а по вертикали сооружения — от 0,120 до 0,142 м/с. Данные условия позволяют во-

влечь в процесс перемешивания с реагентом большее количество загрязненной воды.

Полученные результаты свидетельствуют о более стабильном перемешивании в смесительной камере с поперечными стенками, что в дальнейшем может повысить эффективность протекания химической реакции окисления и очистки сточных вод.

Выводы

С помощью численного моделирования проведена оценка степени перемешивания в смесительной камере различной конструкции. Оценка объемной доли реагента в расчетной области камеры показала эффективность смешения перекиси водорода с потоком воды в 90 % для конструкции, имеющей поперечные пластины. Представленный опыт может быть применен на практике для анализа работы других вариантов конструкций смесительных устройств, а также для оценки эффективности работы очистных сооружений. Полученные результаты соответствуют ожиданиям и могут быть использованы в дальнейшей практической и научной деятельности при разработке комплексных очистных сооружений по очистке сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности.

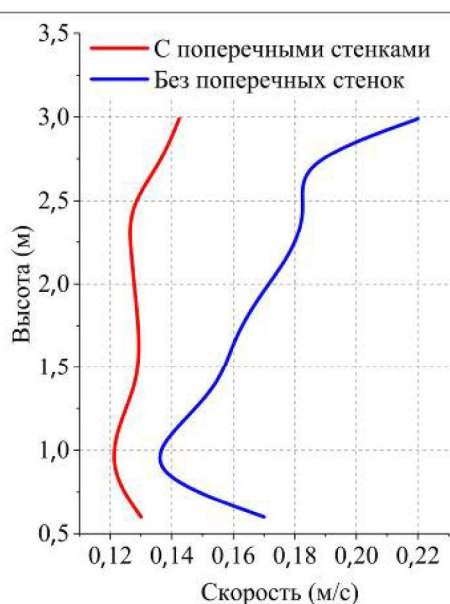


Рис. 7. График изменения средней скорости потока по высоте камеры

Библиографический список

References

1. Zhang H., Zeng M., Zhang S., Wang Z. Analysis of Organic Pollutants in Papermaking Wastewater Characteristics // *Paper and Papermaking*. 2015. № 34 (11). Pp. 74–76. DOI 10.13472/j.ppm.2015.11.019.
2. Li N., Yan J. Application and research progress of advanced oxidation technology in wastewater treatment // *China Resources Comprehensive Utilization*. 2021. № 39 (02). Pp. 99–101.
3. Cai Z. Trends in Molecular Collision Dynamics Research // *International Academic Trends*. 2000. № 4. Pp. 56–57.
4. Sabina Z., Małgorzata K., Piotr K. The use of alternative catalysts in processes of the chemical degradation of di-n-butyl phthalate in aqueous solutions // *Chemosphere*. 2019. № 237. P. 124450. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653519316741#bbib58> (дата обращения: 24.12.2023).
5. 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. № 37 (04). Pp. 433–436.
6. Pishnamazi M., Marjani A., Shirazian S., Samipurigiri M. Mathematical Modeling and Numerical Simulation of Wastewater Treatment Unit Using CFD // *Oriental Journal of Chemistry*. 2012. № 28 (1). Pp. 51–58.
7. Elshaw A., Hassan N. M. S., Khan M. M. K. Computational Fluid Dynamic Modelling and Optimisation of Wastewater Treatment Plant Bioreactor Mixer // *Energies*. 2018. № 11. P. 3530.
8. Moullec Y. Le., Gentric C., Potier O., Leclerc J. P. Comparison of systemic, compartmental and CFD modelling approaches: Application to the simulation of a biological reactor of wastewater treatment // *Chemical Engineering Science*. 2010. № 65 (1). Pp. 343–350.
9. Do-Quang Z., Cockx A., Liné A., Roustan M. Computational fluid dynamics applied to water and wastewater treatment facility modeling // *Environmental Engineering and Policy*. 1998. № 1. Pp. 137–147.
10. Wu M. Y., Cai Q. Q., Xu H. P., Ong S. L., Hu J. Y. Simulation of FBR-Fenton/GAC process for recalcitrant industrial wastewater treatment with a computational fluid dynamics-kinetic model framework // *Water Research*. 2021. № 203. P. 117504.
11. 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*. 2010. URL: https://www.researchgate.net/publication/45458719_A_VOF_method_coupled_with_a_dynamic_contact_angle_model_for_simulation_of_two-phase_flows_with_partial_wetting (дата обращения: 24.12.2023).
1. Zhang H., Zeng M., Zhang S., Wang Z. Analysis of Organic Pollutants in Papermaking Wastewater Characteristics. *Paper and Papermaking*, 2015, no. 34 (11), pp. 74–76. DOI 10.13472/j.ppm.2015.11.019.
2. Li N., Yan J. Application and research progress of advanced oxidation technology in wastewater treatment. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2021, no. 39 (02), pp. 99–101.
3. Cai Z. Trends in Molecular Collision Dynamics Research. *International Academic Trends*, 2000, no. 4, pp. 56–57.
4. Sabina Z., Małgorzata K., Piotr K. The use of alternative catalysts in processes of the chemical degradation of di-n-butyl phthalate in aqueous solutions. *Chemosphere*, 2019, no. 237, p. 124450. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653519316741#bbib58> (accessed: 24.12.2023).
5. 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, no. 37 (04), pp. 433–436.
6. Pishnamazi M., Marjani A., Shirazian S., Samipurigiri M. Mathematical Modeling and Numerical Simulation of Wastewater Treatment Unit Using CFD. *Oriental Journal of Chemistry*, 2012, no. 28 (1), pp. 51–58.
7. Elshaw A., Hassan N. M. S., Khan M. M. K. Computational Fluid Dynamic Modeling and Optimisation of Wastewater Treatment Plant Bioreactor Mixer. *Energies*, 2018, no. 11, p. 3530.
8. Moullec Y. Le., Gentric C., Potier O., Leclerc J. P. Comparison of systemic, compartmental and CFD modeling approaches: Application to the simulation of a biological reactor of wastewater treatment. *Chemical Engineering Science*, 2010, no. 65 (1), pp. 343–350.
9. Do-Quang Z., Cockx A., Liné A., Roustan M. Computational fluid dynamics applied to water and wastewater treatment facility modeling. *Environmental Engineering and Policy*, 1998, no. 1, pp. 137–147.
10. Wu M. Y., et al. Simulation of FBR-Fenton/GAC process for recalcitrant industrial wastewater treatment with a computational fluid dynamics-kinetic model framework. *Water Research*, 2021, no. 203, p. 117504.
11. 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*, 2010. Available at: https://www.researchgate.net/publication/45458719_A_VOF_method_coupled_with_a_dynamic_contact_angle_model_for_simulation_of_two-phase_flows_with_partial_wetting (accessed: 24.12.2023).