

УДК 628.543

© Ли Жуйминь, аспирант

© Е. Л. Терехова, канд. техн. наук, доцент

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

© В. В. Шабалин, д-р биол. наук, доцент

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

E-mail: Liruimin@yandex.ru, kat3000@mail.ru,

ufeofanov@rambler.ru, vvshabalin@mail.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 10.23968/1999-5571-2025-22-6-71-80

© Li Ruimin, post-graduate student

© E. L. Terekhova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

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

© V. V. Shabalin, Dr. Sci. Bio., Associate Professor

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

E-mail: Liruimin@yandex.ru, kat3000@mail.ru,

ufeofanov@rambler.ru, vvshabalin@mail.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

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ТИПА ТРУБНОГО СМЕСИТЕЛЯ РЕАГЕНТА И ВОДЫ С ПОМОЩЬЮ ANSYS FLUENT

### STUDY OF AN ADVANCED TYPE OF REAGENT-WATER TUBE MIXER USING ANSYS FLUENT PROGRAM

Рассматривается вопрос повышения эффективности смешивания воды и реагентов при эксплуатации водопроводных и канализационных очистных сооружений в Китае. Для улучшения смешивания предлагается использование трубных статических смесителей с измененной конструкцией в качестве альтернативы традиционному методу смешивания. Оценка эффективности смешивания реагента осуществлялась с помощью компьютерного моделирования в программе ANSYS FLUENT. В ходе моделирования рассматривалась работа трубных смесителей, эксплуатируемых на очистных сооружениях за рубежом. По результатам расчета анализировались преимущества и недостатки существующих конструкций трубного смесителя и отмечен рост эффективности перемешивания реагента при использовании смесителя, предлагаемого авторами статьи.

*Ключевые слова:* трубный статический смеситель, компьютерное моделирование, ANSYS FLUENT.

This paper addresses the issue of improving the mixing efficiency of water and reagents in the operation of water and wastewater treatment plants in China. To improve mixing, the possibility of using pipe static mixers with a modified design as an alternative to the traditional mixing method is proposed. Reagent mixing performance was evaluated using computer simulation in ANSYS FLUENT program. In the course of modeling, the operation of pipe mixers operated at wastewater treatment plants abroad was considered. According to the results of calculation, the advantages and disadvantages of existing designs of pipe mixer were analyzed and the growth of the efficiency of mixing the reagent when using the mixer proposed by the authors of the article was noted.

*Keywords:* tube static mixer, computer modeling, ANSYS FLUENT program.

#### Введение

Вода является одним из важных ресурсов производственной деятельности и социального развития. С ростом населения Китая и потребностей людей недостаточное обеспечение эффективности очистки воды на водопроводных и канализационных сооружениях стало насущной проблемой. На долю промышленного производства приходится значительная часть водопотребления в Китае,

поэтому оптимизация устаревших процессов очистки воды имеет большое значение для устойчивого развития всей страны. Операции смешивания широко используются в нефтяной, биотехнологической, фармацевтической промышленности, а также при очистке природных и сточных вод. Процесс смешивания оказывает влияние на скорость последующих химических реакций и эффективность очистки. Поэтому операции сме-

шивания оказывают прямое воздействие на затраты производства. Особенно значительный вклад подобные затраты вносят в экономику водопроводных и канализационных очистных сооружений [1–3].

В процессе очистки воды на водопроводных и канализационных очистных сооружениях традиционным технологическим процессом является цепочка «коагуляция–осаждение–фильтрация–обеззараживание», и эффективность коагуляции влияет на последующее разделение твердой и жидкой фаз. Важным фактором, влияющим на эффект коагуляции, является эффективность перемешивания коагулянта, которая на ранней стадии процесса очистки напрямую влияет на эксплуатацию и работу очистных сооружений, а также на соответствие показателей качества воды после очистки стандартам. Если смешивание выполнено плохо, это увеличит нагрузку на последующие очистные сооружения. Оптимальная конструкция смесительного оборудования имеет большое значение, так как способствует улучшению очистки воды на водоочистных сооружениях [4].

Методы смешивания можно разделить на механические и гидравлические. В настоящее время, принимая во внимание площадь, стоимость оборудования, его обслуживание, эксплуатационные расходы и т. д., предпочтение отдается трубному статическому смесителю, обеспечивающему гидравлическое смешивание.

Трубный статический смеситель состоит из встроенных лопастей и труб, которые создают сложное движение потока воды в корпусе смесителя для эффективного смешивания воды с реагентами. По сравнению с механическими смесителями статические занимают меньше места, требуют меньше затрат на производство и установку, подходят для смешивания при низкой скорости потока, обладают лучшей способностью к самоочистке, а также низ-

кой стоимостью эксплуатации и обслуживания [5, 6].

По сей день статические смесители широко используются в химической промышленности [7]: 1) для некоторых сложных операций смешивания; 2) для диспергирования несмешивающихся жидкостей; 3) в области абсорбции газов; 4) для производства эмульсий.

Существует множество компаний, разрабатывающих и производящих статические смесители, такие как спиральные смесители (тип *SK*), смесители с гофрированными пластинами (тип *SMV* — Sulzer Company), смесители с перекладинами (тип *SMX* — Sulzer Company). После того как иностранные смесители стали поставляться в Китай, они получили следующие обозначения (табл. 1): *SK*, *SX*, *CMT*, *SV*, *SY* и т. д. [8–10].

#### Методы

Для того чтобы оценить работу вышеуказанных трубных статических смесителей (см. табл. 1), выполнялось моделирование в программе ANSYS FLUENT с помощью расчетной модели MIXTURE. Для построения модели рассматривались высокотурбулентные типы смесителей *SX*, *CMT*, *SK*. Смесители типа *SY* и *SV* подходят только для смешивания жидкостей и реагентов при низком числе Рейнольдса ( $Re < 2300$ ), поэтому не включены в данный эксперимент по моделированию.

ANSYS FLUENT использует уравнение переноса вещества, основанное на трех уравнениях: сохранения энергии, сохранения импульса и сохранения массы жидкости, для получения усредненных значений физических характеристик с известными граничными условиями. Результатом расчета являются поля скорости, давления и концентрации реагента внутри смесителя с течением времени [11].

В модели задавались следующие начальные и граничные условия: в качестве реагента принимался полимерный хлорид алюминия ( $[Al_2(OH)_n Cl_{6-n}]_m$ ) с концентрацией 2 %,

## Самые популярные трубные статические смесители на рынке для промышленного использования

№	Фото смесителя	Описание смесителя
1		Смеситель типа <i>SK</i> состоит из вращающихся лопастей, каждая лопасть закручена на 180°, образуя спираль, несколько лопастей располагаются друг за другом. Лопастей смесителя типа <i>SK</i> разработаны обтекаемой формы, и он широко используется в химических, нефтяных, фармацевтических и других технологиях
2		Смеситель типа <i>SX</i> состоит из ступенчатых лопастей, расположенных под углом 90° между соседними лопастями, а весь блок лопастей расположен под углом 45°. Смеситель типа <i>SX</i> широко используется для смешивания жидкости с большим расходом
3		Статический смеситель типа <i>CMT</i> состоит из трубы, в которой последовательно установлены смесительные элементы. Чтобы перемешивание жидкости происходило равномерно в вертикальном и горизонтальном направлениях, элементы последовательно повернуты на 90° друг от друга. При прохождении потока под действием элементов происходят внутренние изменения структуры потока, он получается однородным по концентрации состава, температуре и напору
4		У статического смесителя типа <i>SV</i> смесительный элемент состоит из гофрированных пластин, заполняющих трубу. Соседние смесительные гофрированные пластины смещены на 90°, что формирует проточный канал
5		Смеситель типа <i>SY</i> состоит из ступенчато расположенных лопастей, причем лопасти соседних блоков расположены вертикально под углом 90°. Такой поперечный канал способствует непрерывному разделению и слиянию потоков воды, образуя тем самым локальные вихри и ускоряя смешивание

дозировка реагента 50 мг/л, скорость потока дозирования реагента 1 м/с, скорость входа потока воды в смеситель 1,0 м/с, скорость ввода реагента в смеситель 1,0 м/с, плотность воды при комнатной температуре 25 °С составляет  $\rho = 998,3 \text{ кг/м}^3$ , вязкость 0,001003 Па · с [12].

Для создания расчетной области в программе ANSYS FLUENT была разработана геометрическая модель трубного смесителя (рис. 1). Вход и выход воды в модели располо-

жены по оси *X*, а вход для подачи реагента — по оси *Y*. Для оценки распределения реагента в объеме смесителя в расчетной области выделено три сечения в плоскости *XY* (см. рис. 1).

После расчета в программе ANSYS FLUENT были получены фазовые диаграммы смешивания воды и реагента в смесителях типа *SK*, *SX* и *CMT* (табл. 2), на которых красным цветом показана вода, синим — реагент, а зеленый цвет означает полное

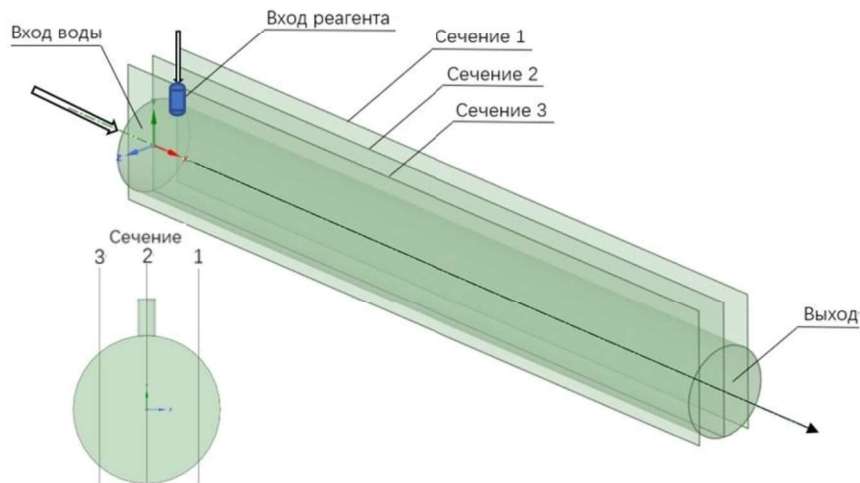


Рис. 1. Расчетная область трубного смесителя

смешивание воды и реагента. Ниже представлены диаграммы изменения давления в трубных статических смесителях типа *SK*, *SX* и *СМТ* (табл. 3). Красным цветом показано самое высокое давление, синим цветом — отрицательное, вакуумметрическое.

Трубный смеситель типа *SK* является популярным статическим смесителем на китайском рынке в настоящее время, он имеет стабильный эффект смешивания, но он не подходит для жидкостей высокой вязкости или высокой скорости потока. Его внутренняя структура обеспечивает стабильность смешивания, но из-за особенностей внутренней структуры на входе возникает большая локальная потеря напора, которая в долгосрочной перспективе приводит к разрушению конструкции смесителя, а высокое давление на входе легко приводит к обратному току реагента в трубку подачи реагента.

Из данных табл. 2 и 3 видно, что из-за неравномерного распределения давления в смесителе оптимальные позиции смешивания воды и реагента в нем находятся в начальной и средней частях трубопровода, в то время как можно заметить, что в конце смесителя реагенты еще не смешались с водой, что отрицательно сказывается на эффективности смешивания.

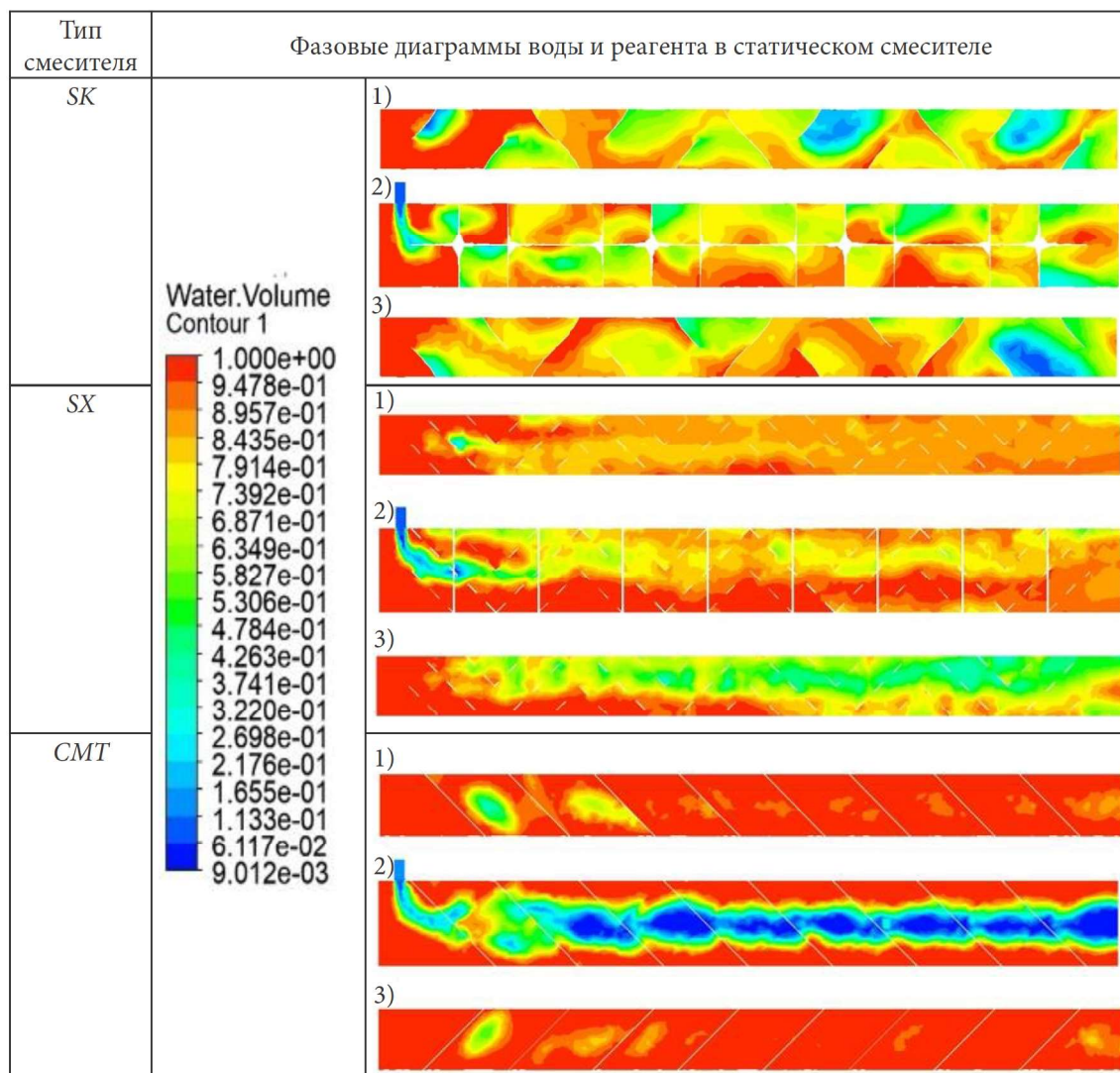
На китайском рынке трубные статические смесители типа *SX* и *SK* относятся к одному и тому же популярному классу смесителей, причем эффективность смешивания у *SX* по сравнению с *SK* выше, отрицательное давление в трубопроводе больше и распределение более равномерное. Из материалов табл. 2 и 3 видно, что смешивание воды и реагента недостаточно, и достаточное смешивание происходит только в левой половине смесителя, что приводит к низкой средней концентрации реагента в смеси на выходе, влияя на процесс флокуляции воды.

Внутренняя структура этого типа трубных статических смесителей слишком сложна, что затрудняет техническое обслуживание и приводит к быстрому износу в ходе эксплуатации. Наличие сложной проточной области с мелкими каналами приводит к быстрому накоплению загрязнений в них и интенсификации процесса коррозии.

Трубные статические смесители типа *СМТ* занимают небольшую долю китайского рынка, но большую — российского. Как видно по диаграммам табл. 2, эффект смешивания хуже всего в их среднем сечении, потому что степень турбулентности потока в середине более низкая, но степень смешивания в боковых сечениях более равномер-

Таблица 2

Фазовые диаграммы смешивания воды и реагента в смесителях типа SK, SX и CMT



ная, что обеспечивает однородность средней концентрации реагента в потоке. Однако данный тип смесителя не обеспечивает эффективного перемешивания, поэтому его следует конструктивно усовершенствовать.

**Исследование усовершенствованной модели трубного смесителя**

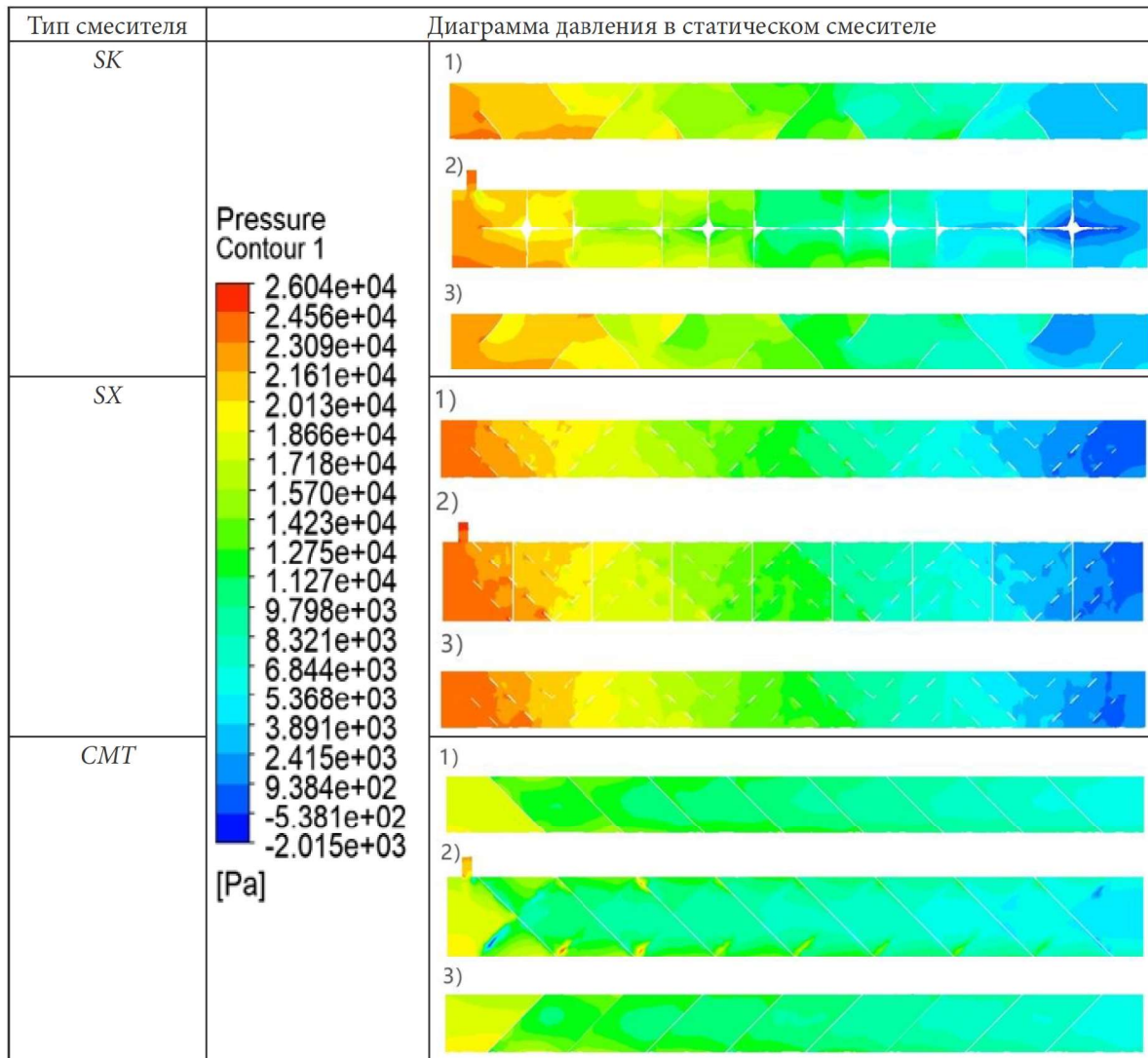
Для того чтобы создать смеситель с высокой пропускной способностью и высоким КПД, в программе ANSYS FLUENT была создана модель усовершенствованной конструкции трубного смесителя (рис. 2).

Конструкция представляет собой новый тип трубного статического смесителя, в котором установлены вертикальные зубчатые перегородки, распределенные неравномерно, и благодаря достаточно большому интервалу между перегородками при смешивании воды и реагентов не будет создаваться большое давление внутри смесителя, со временем приводящее к разрушению его конструкции.

В новом типе трубного статического смесителя используются зубчатые перегородки, расстояние между перегородками составляет  $b_n = 50$  мм, длина каждого зубца составля-

Таблица 3

Диаграммы изменения давления в смесителях типа SK, SX и CMT



ет  $L_{зуб} = 50$  мм, расстояние между пластинами составляет  $l_a = 50$  мм, длина каждого модуля с зубчатыми перегородками составляет  $l_n = 230$  мм. Расстояние между модулями в смесителе составляет половину длины зубца перегородки.

Общая длина перегородок  $L_n$  рассчитывается по следующей формуле, созданной на основе анализа конструкции перегородок, модулей и размеров смесителя:

$$L_n = \frac{0,9L_{труб}}{n}, L_{зш} = \frac{0,9 \times l_{труб}}{6},$$

где 0,9 — процент длины трубы, занимаемой модулем;  $L_{труб}$  — длина трубного смесителя, составляет 1750 мм;  $n$  — количество модулей с зубчатыми перегородками внутри смесителя,  $n = 6$  шт.

**Результаты**

После расчета в программе ANSYS FLUENT были получены следующие результаты.

Сравнение эффективности смешивания воды и реагента для четырех типов трубных статических смесителей по сечению 2 показано на рис. 3 в виде фазовых диаграмм.

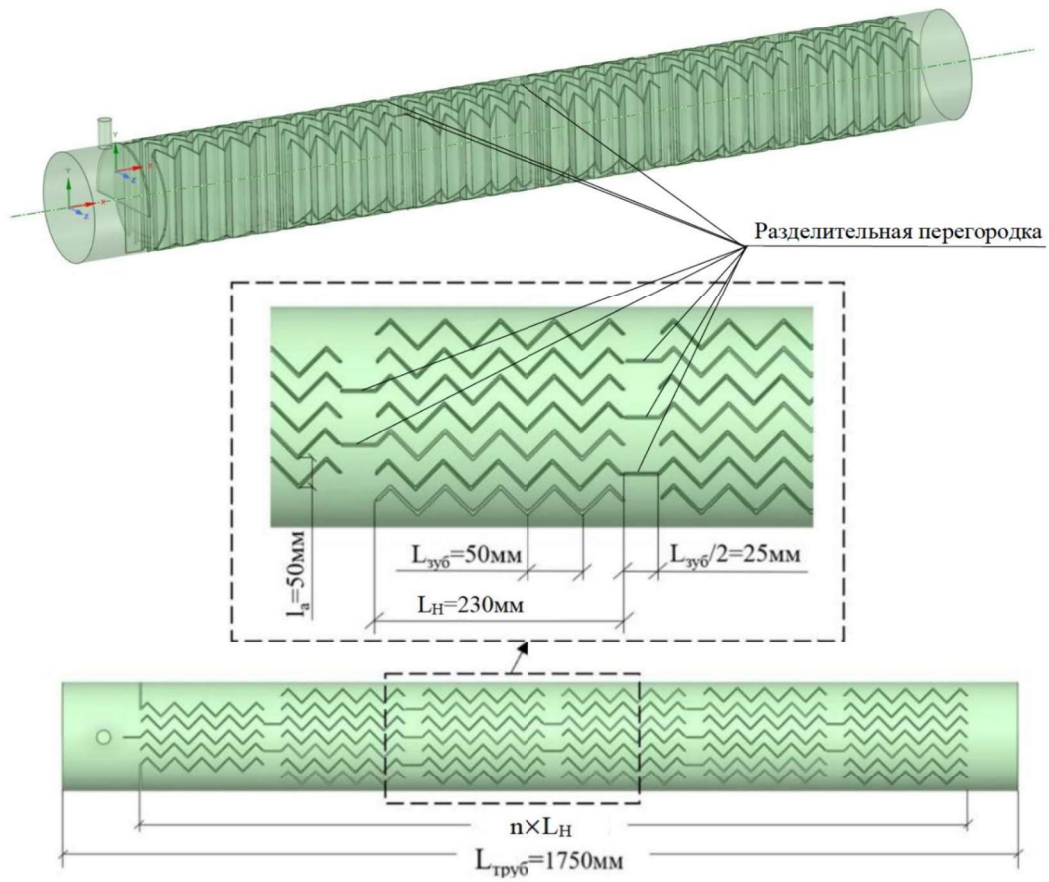


Рис. 2. Конструкция усовершенствованного смесителя

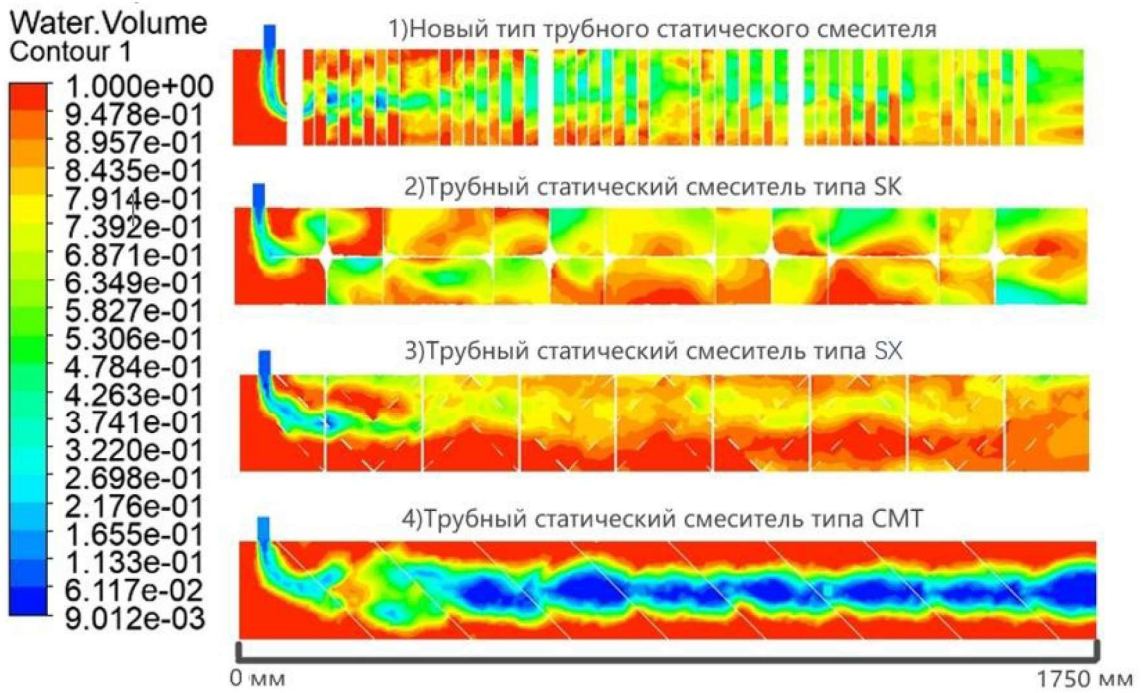


Рис. 3. Сравнение фазовых диаграмм четырех трубных смесителей

Красный цвет представляет водную фазу, а синий — реагент; зеленый цвет на фазовых диаграммах означает, что произошло полное смешивание воды и реагента, т. е. через цвет можно оценить степень смешивания.

Но диаграмме видно, что в новом типе смесителя, начиная со створа, располагающегося в 400 мм от начала трубы, смешивание воды и реагента происходит почти полностью, и этот процесс протекает вплоть до выхода из смесителя. В некоторых местах трубы фиксируется неполное смешивание, но однородное (в 73,8 %), что не оказывает большого влияния на процесс смешивания реагента.

На фазовой диаграмме смесителя типа SK видно, что движение воды и реагента в трубопроводе происходит интенсивно, но степень смешивания в различных областях конструкции имеет четкую разницу. Можно отметить, что эффективность по длине неравномерная, есть зоны, где не произошло смешивание, и в конце смесителя существуют области отсутствия реагента.

Смесители типа SX и CMT обладают наименьшим эффектом смешивания (рис. 4). Смесители типа SX имеют сложную внутреннюю структуру и характеризуются слишком слабой турбулизацией потока, а площадь контакта между потоком воды и струей реагента слишком мала. Эти условия в значительной степени ухудшаются в смесителях типа CMT. Данные типы смесителей целесообразно применять для предварительного смешивания перед подачей потока в камеру смешивания перед отстойником, чтобы увеличить эффективность смешивания воды и реагента в камере. Такие типы смесителей могут быть рекомендованы для применения там, где на очистных сооружениях по технологии применяются камеры смешивания.

#### Обсуждение

Сравнение результатов моделирования различных типов смесителей не является окончательным. Для подтверждения эффективности усовершенствованной конструкции необходимо в дальнейшем про-

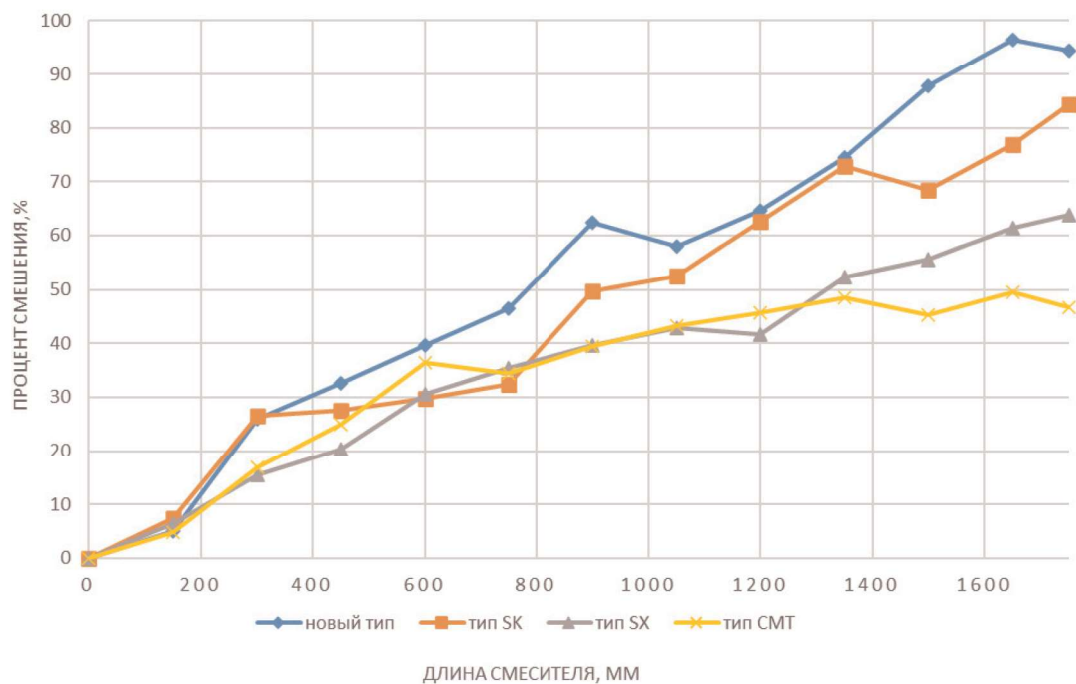


Рис. 4. График степени смешивания по длине смесителя

водить экспериментальные исследования. Результаты модельного расчета могут быть полезны в инженерной практике для подбора оптимальной конструкции трубного смесителя.

### Выводы

В ходе выполнения работы была изучена кинетика смешивания воды и реагента. С помощью программы ANSYS FLUENT были смоделированы и проанализированы рабочие условия трех распространенных трубчатых статических смесителей типов SK, SX, CMT, доступных на рынке, и конструкции смесителя, предлагаемой авторами. В ходе работы были получены фазовые диаграммы и диаграммы давления для всех четырех типов трубчатых статических смесителей. На основе анализа результатов доказано, что существующие смесители не обеспечивают эффективного перемешивания воды с реагентом. Авторами предложена усовершенствованная конструкция трубчатого смесителя, которая позволяет получить степень смешивания до 95 % по сравнению с существующими со степенью смешивания от 47 до 84 %.

### Библиографический список

1. Yu Y., Li Yu, Meng H., Liu H. Enhancement of gas-liquid flow mixing and mass transfer in Lightnin static mixer // *Chemical Industry and Engineering Progress*. 2023. Vol. 42 (12). Pp. 6180–6190.
2. Meng H., Meng T., Yu Y., Wang Z., Wu J. Turbulent heat transfer and mixing enhancement characteristics in Ross LPD static mixer // *CIESC Journal*. 2022. Vol. 73 (8). Pp. 3541–3552.
3. Epoyan S., Sukhorukov G., Volkov V., Haiduchok O. The research of tubular mixer with improved design // *Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020)*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020. Vol. 907. 012050.
4. Li X., He Y., Xin C., Wang Z., Bai X. Flow simulation based on ANSYS Workbench for a new SMX static mixer // *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)*. 2017. Vol. 44 (1). Pp. 69–75.
5. Zhang G. F., Zhang Q., Zhang M. L. Optimization of a new static mixer based on CFD simulation // *China Petroleum Machinery*. 2015. Vol. 43 (11). Pp. 92–95.

6. Pang Bo, Bai Dan. Analysis of energy consumption and mixing effect of bidirectional flow static mixer. Xi'an University of Technology, Master's degree thesis. 2017. 5 p.

7. Coroneo M., Montante G., Paglianti A. Computational Fluid Dynamics Modeling of Corrugated Static Mixers for Turbulent Applications // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012. Vol. 51 (49). Pp. 15986–15996.

8. Meng H., Wang F., Yu Y., Song M., Wu J. A Numerical Study of Mixing Performance of High-Viscosity Fluid in Novel Static Mixers with Multitwisted Leaves // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014. Vol. 53 (10). Pp. 4084–4095.

9. Hanada T., Kuroda K., Takahashi K. CFD geometrical optimization to improve mixing performance of axial mixer // *Chemical Engineering Science*. 2016. Vol. 144. Pp. 144–152.

10. Ren C., Yan K. Study on process parameters of fused deposition rapid prototyping nozzle based on FLUENT simulation // *Casting technology*. 2017. Vol. 6. Pp. 1406–1409.

11. Wang Z., You Z., Ding G., Wang Zh. Effect of twisted elements aspects ratio on the mixing performance of a concentric double helix static mixer // *Journal of Beijing University of Chemical Technology*. 2020. Vol. 47 (1). Pp. 53–60.

12. Zhang C. M., Kong X. L., Wang Z. Y., et al. Research on pressure drop of two-phase flows in SMV static mixer // *Contemporary Chemical Industry*. 2011. Vol. 40 (5). Pp. 490–493.

### References

1. Yu Y., Li Yu, Meng H., Liu H. Enhancement of gas-liquid flow mixing and mass transfer in Lightnin static mixer. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, vol. 42 (12), pp. 6180–6190.
2. Meng H., Meng T., Yu Y., Wang Z., Wu J. Turbulent heat transfer and mixing enhancement characteristics in Ross LPD static mixer. *CIESC Journal*, 2022, vol. 73 (8), pp. 3541–3552.
3. Epoyan S., Sukhorukov G., Volkov V., Haiduchok O. The research of tubular mixer with improved design. *Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020)*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 907, 012050.
4. Li X., He Y., Xin C., Wang Z., Bai X. Flow simulation based on ANSYS Workbench for a new SMX static mixer. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)*, 2017, vol. 44 (1), pp. 69–75.
5. Zhang G. F., Zhang Q., Zhang M. L. Optimization of a new static mixer based on CFD simulation. *China Petroleum Machinery*, 2015, vol. 43 (11), pp. 92–95.

6. Pang Bo, Bai Dan. *Analysis of energy consumption and mixing effect of bidirectional flow static mixer*. Xi'an University of Technology Publ., Master's degree thesis, 2017, 5 p.

7. Coroneo M., Montante G., Paglianti A. Computational Fluid Dynamics Modeling of Corrugated Static Mixers for Turbulent Applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, vol. 51 (49), pp. 15986–15996.

8. Meng H., Wang F., Yu Y., Song M., Wu J. A. Numerical Study of Mixing Performance of High-Viscosity Fluid in Novel Static Mixers with Multitwisted Leaves. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, vol. 53 (10), pp. 4084–4095.

9. Hanada T., Kuroda K., Takahashi K. CFD geometrical optimization to improve mixing performance

of axial mixer. *Chemical Engineering Science*, 2016, vol. 144, pp. 144–152.

10. Ren C., Yan K. Study on process parameters of fused deposition rapid prototyping nozzle based on FLUENT simulation. *Casting Technology*, 2017, vol. 6, pp. 1406–1409.

11. Wang Z., You Z., Ding G., Wang Zh. Effect of twisted elements aspects ratio on the mixing performance of a concentric double helix static mixer. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, 2020, vol. 47 (1), pp. 53–60.

12. Zhang C. M., Kong X. L., Wang Z. Y., et al. Research on pressure drop of two-phase flows in SMV static mixer. *Contemporary Chemical Industry*, 2011, vol. 40 (5), pp. 490–493.