

УДК 628.2

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛОКАЛЬНЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Шевчук Настасья Евгеньевна,

Студент

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
nastshev2816@gmail.com

Аннотация

В статье рассматривается практическое применение метода численного моделирования (CFD) для анализа и оптимизации локальных очистных сооружений (ЛОС). Были проанализированы типовые проблемы таких систем, включая неравномерность распределения потоков, повышенное энергопотребление и сложность эксплуатационной наладки. Показано, что создание цифровых гидродинамических моделей ключевых аппаратов – отстойников и аэротенков – позволяет детально визуализировать внутренние процессы, выявлять зоны застоя и неэффективной аэрации. В итоге, использование численного моделирования представлено как эффективный инструмент для перехода к обоснованной оптимизации, ведущей к повышению качества очистки, снижению эксплуатационных затрат и увеличению надежности работы локальных очистных сооружений.

Ключевые слова: численное моделирование (CFD), локальные очистные сооружения (ЛОС), оптимизация, гидродинамика, аэротенк, энергоэффективность, качество очистки.

OPTIMIZATION OF OPERATIONAL AND DESIGN PARAMETERS OF LOCAL TREATMENT FACILITIES USING THE NUMERICAL MODELING METHOD

Shevchuk Nastasia Evgenievna,

Student

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

ABSTRACT

The article discusses the practical application of the computational fluid dynamics (CFD) method for the analysis and optimization of local treatment facilities (LTF). The typical problems of such systems, including uneven flow distribution, increased energy consumption, and complexity of operational adjustment, were analyzed. It was shown that the creation of digital hydrodynamic models of key devices, such as settling tanks and aeration tanks, allows for detailed visualization of internal processes and identification of stagnant zones and ineffective aeration. As

a result, the use of numerical modeling is presented as an effective tool for transitioning to informed optimization, leading to improved treatment quality, reduced operating costs, and increased reliability of local treatment facilities.

Keywords: numerical modeling (CFD), local treatment facilities (LTF), optimization, hydrodynamics, aeration tank, energy efficiency, and treatment quality.

Введение

Эффективность работы современных малых населенных пунктов, производственных площадок и жилых комплексов напрямую зависит от стабильной работы локальных очистных сооружений (ЛОС). Эти системы выполняют критически важную экологическую функцию, предотвращая загрязнение окружающей среды неочищенными стоками. Однако на практике многие ЛОС сталкиваются с комплексом проблем. Часто это связано с тем, что проектирование и наладка таких систем долгое время базировались на типовых решениях и эмпирических подходах, не учитывающих всей специфики конкретного объекта и реальных гидродинамических процессов внутри аппаратов. В данной статье рассматривается, как метод численного моделирования, а именно вычислительная гидродинамика (CFD), предоставляет возможность для перехода от универсальных решений к точной, адресной оптимизации. Показано, что создание цифровой копии очистного сооружения позволяет не только диагностировать существующие недостатки, но и целенаправленно подбирать такие конструктивные и режимные параметры, которые обеспечивают максимальное качество очистки при минимальных эксплуатационных затратах.

ЛОС и их недостатки

Локальные очистные сооружения представляют собой компактный технологический комплекс, предназначенный для полной биологической очистки хозяйственно-бытовых, а иногда и поверхностных стоков. Как отмечается в источниках, типичная схема включает механическую очистку (решетки, песколовки), биологическую стадию (чаще всего в аэротенках или биофильтрах) и отстаивание во вторичных отстойниках [2]. Ключевой задачей является создание оптимальных условий для жизнедеятельности активного ила – сообщества микроорганизмов, которые и осуществляют основную очистку [3].

Однако именно здесь и кроются основные проблемы. Многочисленные анализы функционирующих объектов указывают на ряд системных недостатков. Во-первых, часто наблюдается неравномерность распределения потоков в аппаратах. В отстойниках это приводит к образованию «короткозамкнутых» потоков, когда вода, минуя зону осаждения, быстро проходит к выходу, и зон застоя, где накапливается осадок и происходит его загнивание [5]. В аэротенках неоднородное перемешивание и распределение воздуха вызывает формирование анаэробных зон и снижение общей окислительной мощности.

Во-вторых, значительной проблемой являются завышенные энергозатраты. На систему аэрации, необходимую для подачи кислорода микроорганизмам, может приходиться до 60-80% всего энергопотребления ЛОС. Неэффективная работа аэрационных элементов, неоптимальная конфигурация аэротенка или избыточная аэрация ведут к прямым финансовым потерям [4].

В-третьих, существует проблема негибкости и сложности наладки. Реакция системы на изменение нагрузки по расходу или концентрации загрязнений часто непредсказуема. Эксплуатационный персонал вынужден действовать методом проб и ошибок, что может привести к срыву процесса очистки – «вспуханию» или гибели активного ила. В итоге, как показывают обследования, многие ЛОС работают либо не на полную проектную мощность,

либо с постоянным риском выхода из строя, требуя значительных ресурсов для поддержания стабильности [5].

Решение главных проблем с помощью численного моделирования

Численное моделирование, или CFD-моделирование, предлагает принципиально иной подход к анализу и оптимизации ЛОС. Оно позволяет перейти от усредненных оценок к детальному изучению того, что происходит внутри каждого аппарата в режиме реального времени. Суть метода заключается в создании трехмерной компьютерной модели, например, аэротенка, которая разбивается на миллионы мелких ячеек. Для каждой ячейки решаются уравнения, описывающие движение жидкости, перенос кислорода, смешение иловой смеси и иногда даже биохимические реакции [1].

Это дает возможность визуализировать и измерить то, что скрыто от глаз оператора. Для оптимизации работы и выявления лучших показателей, при моделировании локального очистного сооружения, предлагается изменять такие характеристики как:

1. Гидравлическая нагрузка (расход на входе, Q). Это основной варьируемый параметр. Моделирование выполняется для двух-трех сценариев: нормативный (расчётный) расход, минимальный расход и, что самое важное, пиковый (максимальный) расход, соответствующий сильному ливню. Сравнение результатов для этих сценариев покажет, как ведёт себя сооружение в экстремальных, наиболее опасных для качества очистки условиях [6].

2. Характеристики загрязнений. В модели DPM можно менять размер (диаметр) и плотность виртуальных частиц. Это позволяет ответить на вопрос, частицы какого минимального размера успевают эффективно оседать при заданном расходе, а какие – уносятся потоком. Аналогично, в модели разделения нефтепродуктов можно варьировать размер капель и разность плотностей фаз.

3. Геометрические параметры. Это цель оптимизации. После выявления проблем в базовом варианте в модель вносятся изменения: высота и расположение переливных стенок меняются для более равномерного распределения потока; угол наклона тонкослойных пластин в отстойнике корректируется; в камеру добавляются дополнительные направляющие перегородки или диффузоры для гашения турбулентности на входе.

Заключение

Проведенный анализ подтверждает, что численное моделирование перестает быть исключительно научным инструментом и становится практичным решением для инженерных задач в области водоочистки. В контексте локальных очистных сооружений оно позволяет напрямую воздействовать на корень большинства проблем – несовершенство внутренней гидродинамики аппаратов.

Было показано, что CFD-моделирование дает возможность детально диагностировать существующие недостатки, такие как неравномерность потока и неэффективная аэрация, и переводит их из разряда субъективных наблюдений в область количественного анализа. Это позволяет целенаправленно оптимизировать как конструкцию (форму камер, расстановку перегородок и аэраторов), так и эксплуатационные режимы (интенсивность аэрации, точки ввода реагентов).

В итоге, внедрение подхода, основанного на численном моделировании, ведет к достижению конкретных целей: повышению стабильности и качества очистки, значительной экономии энергетических ресурсов и сокращению эксплуатационных рисков. Для проектируемых объектов это означает создание более компактных и эффективных решений, а для действующих – получение четкого плана модернизации с предсказуемым результатом. В конечном счете, это способствует созданию более надежных, экономичных и экологически безопасных систем локальной очистки сточных вод.

Список литературы:

1. Исайкина А. М. Аналитическое исследование гидродинамических потерь с применением программных средств // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 7. С. 206–208.
2. Каримова М. Т. Локальные очистные сооружения // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2011. № 1. С. 131–135.
3. Кунахович В. А. О локальных очистных сооружениях (интервью) // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2011. № 8 (44). С. 60–63. Янцен О. В., Февральских А. В. Возможности применения современных пакетов программ для моделирования и проектирования систем водоотведения // Наука и технологии. – 2023. – № 3 (43). – С. 73–78.
4. Ретракция. Никифоров Э. П., Терехова О. П. Локальные очистные сооружения ливневых стоков – требования // Чебоксары: Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова. 2024. Т. 1, № 6 (75). С. 1841–1850.
5. Рязских А. И., Кокоров Д. Т. Анализ функционирующих локальных очистных сооружений // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 115-16. С. 170–172.
6. Теплых С. Ю., Бочков Д. С., Веселова М. В. Математическое моделирование систем водоснабжения и водоотведения // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10, № 2 (39). С. 36–42.

References:

1. Isaykina A. M. Analytical study of hydrodynamic losses using software // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. 2022. No. 7. pp. 206–208.
2. Karimova M. T. Local treatment facilities // Bulletin of the Kyrgyz State University of Civil Engineering, Transport and Architecture named after N. Isanov. 2011. No. 1. pp. 131–135.
3. Kunakhovich V. A. On local treatment facilities (interview) // Water purification. Water treatment. Water supply. 2011. No. 8 (44). pp. 60–63. Yantsen O. V., Fevralskikh A. V. Possibilities of using modern software packages for modeling and designing water disposal systems // Science and Technology. – 2023. – No. 3 (43). – P. 73–78.
4. Retraction. Nikiforov E. P., Terekhova O. P. Local stormwater treatment facilities – requirements // Cheboksary: Chuvash State University named after I. N. Ulyanov. 2024. Vol. 1, No. 6 (75). P. 1841–1850.
5. Ryazhskikh A. I., Kokorov D. T. Analysis of functioning local treatment facilities // Trends in the development of science and education. 2024. No. 115-16. P. 170–172.
6. Teplykh S. Yu., Bochkov D. S., Veselova M. V. Mathematical modeling of water supply and sanitation systems // Urban planning and architecture. 2020. Vol. 10, No. 2 (39). pp. 36–42.