

На правах рукописи



ЮЙ Шуайсянь

**РАЗРАБОТКА ТОНКОСЛОЙНОГО МОДУЛЯ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭФФЕКТА ЭЖЕКТИРОВАНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ
ЧАСТИЦ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

Специальность: 2.1.4. Водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: **Федоров Святослав Викторович,**
кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Матюшенко Анатолий Иванович,**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», кафедра инженерных систем
зданий и сооружений, заведующий;

Вялкова Елена Игоревна,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», кафедра инженерных систем и
сооружений, доцент.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный архитектурно-
строительный университет (Сибстрин)».**

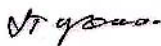
Защита диссертации состоится «16» декабря 2026 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.03 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, ауд. 220.

Тел./факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/yuy-shuaysyan>

Автореферат диссертации разослан «26» октября 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



В. А. Пухкал

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. Отстойники с тонкослойными модулями являются важной частью технологий очистки сточных вод и имеют широкий спектр применения. Монтаж модулей осуществляется в существующих отстойниках большой производительности и комплексных установках локальной очистки. В настоящее время развитие и рост крупных городов приводит к увеличению объема сточных вод и повышенной нагрузке на существующие очистные сооружения. В дальнейшем это приводит к частому заиливанию тонкослойных модулей, снижая эффективность очистки и поломке самих конструкций. Данные проблемы актуальны и являются причиной проведения дальнейших научных исследований с целью совершенствования и оптимизации конструкции тонкослойного модуля. Для соблюдения экологической безопасности окружающей среды необходимо улучшать данную технологию, увеличивая эффективность очистки и снижая величину эксплуатационных затрат.

Степень разработанности темы исследования. По вопросам очистки сточных вод, совершенствования конструкции тонкослойного модуля, повышения эффективности осаждения и изучения теоретических основ движения взвешенных частиц внутри модуля проведены исследования многими отечественными и зарубежными учеными: Е. П. Лашкивским, В. Г. Ивановым, В. А. Кузенковым, Ю. А. Феофановым, Н. А. Черниковым, Л. Д. Тереховым, Е. И. Вялковой, К. Hirom, Т. Т. Devi, М. Р. Bhorkar, Р. В. Nagarnaik, Sh. Juraev, A. Akramov, A. Abdurazzokov, U. Pathidinova, Chuan Pan, Weichao Ma, Chunran Zhang, Minghao Lu и др.

Цель исследования заключается в разработке научно обоснованного технического решения тонкослойного модуля, обеспечивающего повышение эффективности улавливания взвешенных частиц из потока сточных вод.

Задачи исследования:

1. Разработка конструкции тонкослойного модуля, обеспечивающего процесс увлечения (эжектирования) взвешенных частиц в канал отведения осадка.
2. Разработка математической модели траектории движения взвешенной частицы в межпластиночном пространстве с учетом воздействия на нее силы увлекающего потока воды.
3. Создание лабораторной физической модели тонкослойного модуля, проведение экспериментальных исследований по оценке эффективности осаждения взвешенных частиц.
4. Проведение конечно-элементного анализа функционирования модуля в ANSYS FLUENT для оценки траекторий взвешенных частиц и влияния конструктивных параметров на эффект очистки. Сравнение результатов работы с данными по работе тонкослойных модулей других конструкций.

5. Аprobация работы тонкослойного модуля при очистке сточных вод.

6. Обобщение и анализ экспериментальных и расчетных данных, получение зависимостей для определения эффективности очистки сточных вод и проведения инженерных расчетов, оценка экономического эффекта при использовании нового модуля.

Объект исследования. Тонкослойный модуль для очистки сточных вод.

Предмет исследования. Процесс осаждения взвешенных частиц в тонкослойном модуле с частичным отводом расхода воды из канала осветления в канал удаления осадка через разделительную перфорированную пластину с последующим направлением ее на повторную очистку.

Методология и методы исследования. В данном исследовании проанализированы литературные источники, посвященные механизму осаждения взвешенных частиц в тонкослойных модулях, материалы по исследованиям существующих конструктивных решений тонкослойных модулей, нормативные документы, регламентирующие качество очищенной воды на выходе из тонкослойных модулей. Разработана модель скорости осаждения и движения частиц в тонкослойном модуле новой конструкции. Использованы методы физического моделирования на лабораторной установке. Применен метод математического моделирования движения воды и частиц в конструкции тонкослойного модуля с использованием программного пакета ANSYS FLUENT. Проведена оценка влияния геометрических параметров модуля на эффективность осаждения, а также выполнен расчет капитальных и эксплуатационных затрат для оценки стоимости очистки.

Область исследования. Соответствует паспорту научной специальности 2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов, а именно п. 3 «Методы очистки природных и сточных вод, технологические схемы и конструкции используемых сооружений, установок, аппаратов и механизмов», п. 8 «Гидравлические закономерности, определяющие эффективность работы водопроводных и канализационных сооружений и устройств, их отдельных элементов, систем водоподачи и водоотведения».

Научная новизна исследования:

1. Предложено и доказано использование эффекта эжектирования для уменьшения длины пути взвешенной частицы в потоке сточных вод.

2. Получены закономерности изменения скорости осаждения частиц от расхода воды и фракции частиц в новом тонкослойном модуле.

3. Получены зависимости эффективности осаждения взвешенных частиц от скорости потока и площади отверстий в разделительных пластинах модуля новой конструкции.

Теоретическая значимость. Расширена область применения эффекта эжектирования на процесс осаждения частиц, реализуемый в тонкослойном модуле.

Практическая значимость. Предложена конструкция тонкослойного модуля с применением эффекта эжектирования, обеспечивающая улавливание взвешенных частиц. Конструкция тонкослойного модуля внедрена на проектной площадке в КНР (подтверждено актом о внедрении).

Положения, выносимые на защиту:

1. Оценка влияния эффекта эжектирования на траекторию движения взвешенной частицы в межпластинчатом пространстве модуля.
2. Закономерности изменения скорости осаждения частиц от расхода воды и фракции частиц в новом тонкослойном модуле.
3. Зависимости эффективности осаждения взвешенных частиц от скорости потока и площади отверстий в разделительных пластинах модуля новой конструкции.
4. Рекомендации по назначению характеристик тонкослойного модуля. Результаты испытания по очистке сточных вод. Оценка экономического эффекта применения тонкослойного модуля.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследования подтверждается применением сертифицированных программных комплексов (ANSYS FLUENT 2021 R1, Origin 2024) и поверенных приборов при проведении эксперимента (Колориметр для определения ХПК Rocker LEI-5000, портативный мутномер 2100Q IS), достаточным количеством экспериментальных и модельных результатов, обеспечивающим необходимую точность при определении концентрации взвешенных частиц на входе и выходе из экспериментальной и полупроизводственной установок.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях: на Межвузовской научно-практической конференции «Современные проблемы водоснабжения и водоотведения» (г. Санкт-Петербург, 1–2 декабря 2022 г.), Национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Инженерные системы и городское хозяйство» (г. Санкт-Петербург, 20–24 марта 2023 г.), XI международной научно-практической конференции «Новые достижения в областях водоснабжения, водоотведения, гидравлики и охраны водных ресурсов» (г. Санкт-Петербург, 15–17 ноября 2023 г.), Национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве» (г. Санкт-Петербург, 18–22 марта 2024 г.), Международной научно-технической конференции «Строительство, архитектура и техносферная безопасность» (г. Сочи, 8–14 сентября 2024 г.), LXXVII Национальной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы со-

временного строительства» (г. Санкт-Петербург, 15–18 октября 2024 г.), Национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве» (г. Санкт-Петербург, 24–28 марта 2025 г.).

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 7 статьях (4,00 п.л.), в числе которых 6 (3,53 п.л.) опубликованы в изданиях, рекомендуемых перечнем ВАК РФ, 1 (0,47 п.л.) в изданиях, входящих в международную базу Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация включает: введение, четыре главы, заключение, список литературы из 193 наименований работ отечественных и зарубежных авторов и 7 приложений. Работа изложена на 121 странице основного текста и 37 страницах приложений, содержит 13 таблиц, 49 рисунков и 60 формул.

Во введении обоснована актуальность исследования и значимость для развития отрасли очистки сточных вод. Сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна.

В первой главе обоснована актуальность совершенствования конструкций тонкослойных модулей в технологиях очистки сточных вод. Проведен анализ эксплуатационных проблем, связанных с гидравлической разбалансировкой и заиливанием проточной области. Предложена усовершенствованная схема работы тонкослойного модуля. Проведен анализ сил, действующих на взвешенную частицу.

Во второй главе разработана усовершенствованная конструкция тонкослойного модуля. На основе сравнительного анализа установлено, что предложенная конструкция обеспечивает сокращение траектории улавливания осаждающихся частиц и существенное увеличение скорости их осаждения за счет гидродинамического воздействия увлекающего потока, что повышает эффективность очистки сточных вод.

В третьей главе проведено физическое и математическое моделирование гидродинамических процессов в разработанном тонкослойном модуле. Определены оптимальная конструкция и параметры работы тонкослойного модуля. Доказана эффективность осаждения по сравнению с классической конструкцией.

В четвертой главе описана апробация новой конструкции тонкослойного модуля на полупроизводственной установке по очистке реальных сточных вод, представлены результаты эффективности осаждения и предложены расчетные зависимости для инженерного проектирования. С помощью экономического расчета обоснована целесообразность применения нового тонкослойного модуля.

В заключении представлены основные итоги диссертационной работы и перспективы дальнейших исследований.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Оценка влияния эффекта эжектирования на траекторию движения взвешенной частицы в межпластинчатом пространстве модуля.

В данном исследовании предложена новая конструкция тонкослойного модуля, направленная на улучшение эффективности отделения частиц от потока в межпластинчатом пространстве и оптимизации траектории движения осаждающихся частиц. На рисунке 1 представлена схема отстойника с новым тонкослойным модулем. В данном случае межпластиночное пространство классического модуля разделяется на два отдельных проточных канала: канал движения загрязненной воды и канал движения осадка. Канал осадка выполнен в виде замкнутого пространства и соединен в нижней части с общей трубой выгрузки осадка, на которой располагаются регулирующие клапаны. Между каналом осадка и каналом движения сточных вод в пластине имеется ряд отверстий, которые частично перенаправляют поток сточных вод в канал удаления осадка, способствуя увлечению осаждающихся частиц. Во время работы отстойника, меняя степень открытия регулирующих клапанов на трубах выгрузки осадка, можно изменять скоростной режим в каналах осаждения.

В дальнейшем отводимая с осадком вода отделяется в бункере осадка и возвращается в голову сооружения для повторной очистки. С целью обеспечения энергоэффективной работы сооружения в качестве устройства подъема воды из бункера осадка может быть предложено использование сифонного трубопровода.

Основными характеристиками модульной конструкции являются (рисунок 2): высота модуля (H), ширина модуля (B), расстояние между пластинами (b), угол наклона пластин (принимался равным 60°), а также площадь, занимаемая отверстиями.

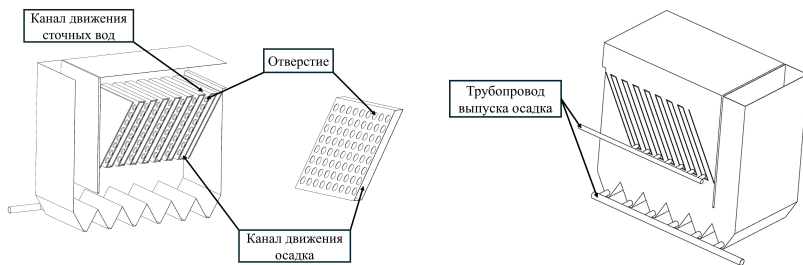


Рисунок 1 – Схема устройства отстойника с новым тонкослойным модулем

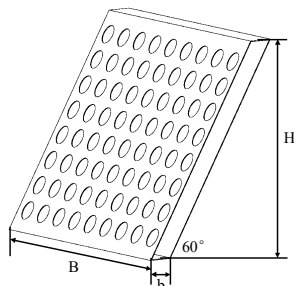


Рисунок 2 – Схема конструкции канала движения осадка

Частицы в воде подвержены не только действию объемных сил (сила Архимеда и сила тяжести), но и множеству других сил, включая силу сопротивления жидкости, силу Бассета, поднимающую силу, вызванную вращением частиц (эффект Магнуса), поднимающую силу, вызванную сдвигом жидкости (сила Сафмана), и сил взаимодействия между частицами. При совместном действии этих сил частицы в тонкослойном модуле будут двигаться по определенной траектории. Для обеспечения точности при создании математической модели движения частицы и вместе с тем упрощения сложной задачи были сделаны следующие дополнительные допущения: частицы считаются жесткими однородными сферами, а жидкость – несжимаемой; движения частиц в тонкослойном модуле считаются независимыми друг от друга; частицы не деформируются; частицы не контактируют друг с другом.

Рассмотрим силы, определяющие движение частицы в новом тонкослойном модуле (рисунок 3). Согласно схеме, поток воды поступает в модуль вертикально. Модуль состоит из наклонных пластин, которые наклонены к горизонтальной плоскости под углом θ . В данном случае рассматривается плоская задача. Начало координат плоскости XOY находится на верхней пластине. Ось OY параллельна, а OX нормальна к пластинам модуля.

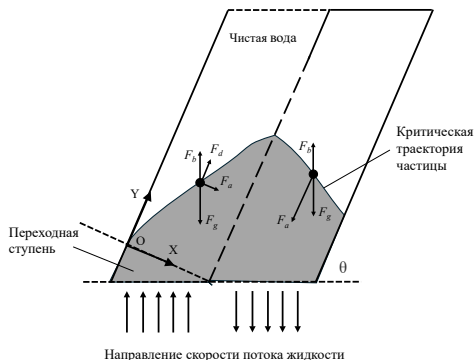


Рисунок 3 – Силы, действующие на частицу в новом тонкослойном модуле

Определим зависимость для каждой силы и скорость оседания частиц в новом модуле. По второму закону Ньютона уравнение движения частицы вдоль оси-у имеет следующий вид:

$$F_g \sin \theta - F_b \sin \theta + F_a = m_q \frac{du}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{4\pi r_q^3}{3} \left[g \sin \theta (\rho_q - \rho_{ж}) + \frac{\rho_q Q_k^2}{V_k \cdot \omega_k} \right] = m_q \frac{du_q}{dt} \quad (2)$$

где: θ – угол наклона пластин, град.;

F_g – вес частицы, Н;

F_b – сила Архимеда, действующая на частицу, Н;

F_a – сила воздействия увлекающего потока воды на частицы, Н;

m_q – масса частицы, кг;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³;

ρ_q – плотность взвешенных частиц, кг/м³;

r_q – радиус частиц, м;

Q_k – расход увлекаемого потока, м³/с;

V_k – объем воды в канале осадка, м³;

ω_k – сечение канала движения осадка, м²;

u_q – теоретическое значение скорости осаждения частиц (гидравлическая крупность), м/с.

Решая уравнение (2), получаем выражение для конечной скорости оседания частиц:

$$u_q = u_{ж} - \left(g \sin \theta (\rho_q - \rho_{ж}) + \frac{\rho_q^2 Q_k^2}{V_k \cdot \omega_k} \right) \quad (3)$$

где: $u_{ж}$ – средняя скорость потока воды в межпластиночном пространстве, м/с;

Уравнения траектории движения частиц будут иметь следующий вид:

$$x(t) = x_0 + t \left(u_{ж} \cos \theta - \left(g \sin \theta \cos \theta (\rho_q - \rho_{ж}) + \frac{\rho_q^2 Q_k^2}{V_k \cdot \omega_k} \right) \right) \quad (4)$$

$$y(t) = y_0 + t \left(u_{ж} \sin \theta - \left(g \sin^2 \theta (\rho_q - \rho_{ж}) + \frac{\rho_q^2 Q_k^2}{V_k \cdot \omega_k} \right) \right) \quad (5)$$

где: x_0, y_0 – координаты начального положения частиц в модуле;

t – время движения частиц, с.

Используя зависимости (4) и (5), были получены графики траектории частицы (рисунок 4, б). На график также вынесен график траектории для классической конструкции (рисунок 4, а). Для оценки траектории задавались следующие характеристики: плотность частиц $\rho_q = 1100$ кг/м³, диаметр

частиц $d_{\text{ч}} = 100$ мкм, угол тонкослойного модуля $\theta = 60^\circ$, скорость потока сточных вод $u_{\text{ж}} = 0,01$ м/с, скорость увлекаемого потока $u_{\text{к}} = 0,0001$ м/с.

Сравнение траекторий движения частиц на рисунке показывает, что в новой конструкции эффективный путь осаждения значительно сокращается под воздействием увлекающего потока воды. Вблизи отверстий траектории частиц отклоняются, и они поступают в канал осадка, где происходит их быстрое оседание. Частицы подвергаются совместному воздействию нисходящей гидродинамической силы и силы тяжести, что увеличивает скорость осаждения. Таким образом, новая конструкция снижает негативное влияние восходящего потока на оседающие частицы, характерное для классической схемы.

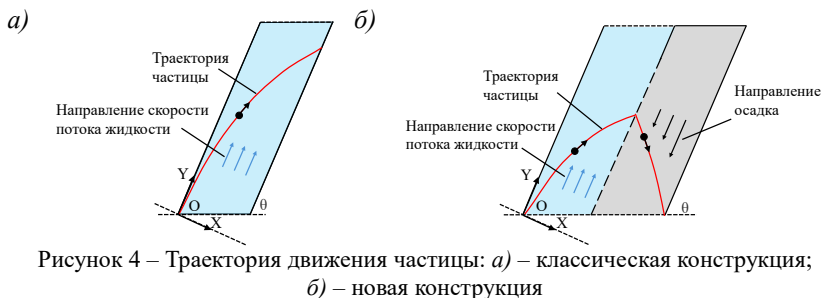


Рисунок 4 – Траектория движения частицы: а) – классическая конструкция; б) – новая конструкция

2. Закономерности изменения скорости осаждения частиц от расхода воды и фракции частиц в новом тонкослойном модуле.

В лабораторном эксперименте рассматривалась работа нового тонкослойного модуля, имеющего одно межпластиночное пространство, разделенное перфорированной стенкой на канал движения воды и канал отведения осадка (рисунок 5). Модуль размещался в открытой емкости из оргстекла размером $440 \times 160 \times 340$ мм (длина $\times$ ширина $\times$ высота). Внутри емкости установлены три наклонные пластины размером 160×150 мм (ширина $\times$ высота). В центральной пластине были выполнены отверстия диаметром 5 мм. Всего 13 рядов, в каждом ряду располагалось по 10 отверстий. Угол наклона пластины составлял 60° , Ширина канала движения загрязненной воды и канала движения осадка составляла – 35 мм.

Вода подавалась из резервуара (10) с помощью центробежного насоса (8) по трубопроводу диаметром 25 мм (2) в приемную емкость (3) из которой через отверстие направлялась в основную емкость с тонкослойным модулем (4). Для регулирования расхода в напорной трубе предусматривался шаровый кран диаметром 25 мм (6).

Экспериментальная установка работала по оборотной схеме и имела три функциональных зоны, аналогично конструкции локальных очистных сооружений:

1. Зона входа. Поток поступает через выходное отверстие приемной емкости (3) и движется вниз. В данной области происходит осаждение наиболее крупной фракции взвеси.

2. Зона тонкослойного модуля. Поток заворачивает в тонкослойный модуль, где происходит частичное отделение потока через перфорированную пластину в канал движения осадка. Увлечение потока в канал движения осадка обеспечивается за счет сифонного трубопровода (5) диаметром 8 мм.

3. Зона выхода. После выхода из тонкослойного модуля поток направляется в приемную емкость очищенной воды (13), к которой подключалась труба диаметром 25 мм для сброса воды в приемный резервуар.

Запуск взвешенных частиц осуществлялся в приемную емкость (3) после наступления установившегося движения в оборотной системе установки. Исходная концентрация частиц задавалась следующим образом: точно отмеренная на лабораторных весах масса твердых частиц добавлялась к известному объему воды. Для поддержания неизменной концентрации взвесь в приемной емкости (3) непрерывно перемешивалась с помощью механической мешалки.

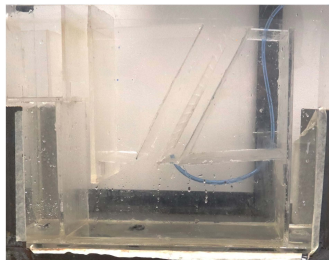
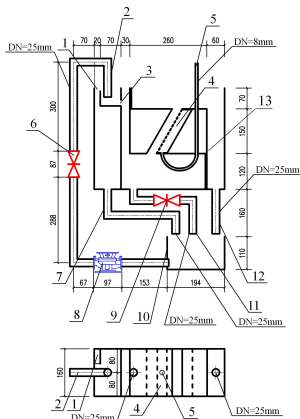


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки:

- 1) переливная труба; 2) труба подачи воды; 3) отверстие подачи воды с частицами;
- 4) тонкослойный модуль; 5) сифонная труба; 6) шаровой кран; 7) труба отведения переливного стока; 8) центробежный насос; 9) шаровой кран; 10) резервуар с водой;
- 11) труба опорожнения; 12) труба отведения чистой воды; 13) емкость чистой воды

На установке было проведено две серии опытов.

1) Первая серия опытов

В ходе наблюдения осуществлялась фиксация траектории и скорости движения осаждающихся частиц с момента попадания их в канал движения осадка до осаждения на дно. В ходе эксперимента измерялась длина зоны

оседания, а также фиксировалось время оседания, после чего определялась конечная скорость оседания частиц. Эксперимент выполнялся для каждой фракции частиц отдельно (таблица 1). Для исключения ошибок измерения каждой характеристики осуществлялось пять раз и конечный результат усреднялся.

Таблица 1 – Условия проведения опыта

№ серии опытов	Диаметр частиц, $d_{\text{ч}}$, м	Расход воды на входе, Q , л/с	Расход сифонной трубы, $Q_{\text{к}}$, л/с
1	0,0001	0,015; 0,046; 0,077; 0,108; 0,139	0,0112
2	0,0002		
3	0,0003		
4	0,0004		

Результаты экспериментов представлены точками на графике (рисунок 6). Черной линией отражены теоретические результаты, полученные с помощью уравнения (3). Следует отметить хорошую сходимость экспериментальных и теоретических данных. По мере увеличения размера частиц конечная скорость оседания увеличивается, что соответствует ожиданиям. Увеличение расхода очищаемой воды приводит к уменьшению скорости оседания.

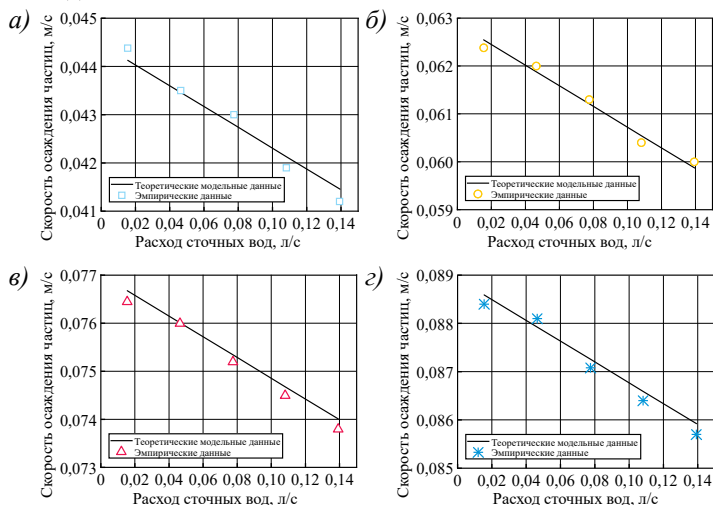


Рисунок 6 – Зависимость конечной скорости оседания частиц в зависимости от расхода воды и фракции частиц: а) опыт 1; б) опыт 2; в) опыт 3; з) опыт 4

2) Вторая серия опытов

Во второй серии опытов оценивалось влияние соотношения общего и увлекаемого расхода на процесс отделения взвешенных частиц. Величина увлекаемого расхода играет ключевую роль в формировании поля скорости в канале очистки и удалении взвешенных частиц в канале осадка модуля.

Целью являлось определение регрессионной зависимости между эффективностью осаждения частиц и скоростью увлекаемого потока при условии постоянства расхода воды, подаваемого на очистку, и концентрации взвешенных частиц.

Скорость увлекаемого потока воды в системе регулировалась с помощью сифонного трубопровода. Оценка количества осевших частиц осуществлялась путем сравнения исходной массы инъецированных частиц и массы частиц, которые покинули тонкослойный модуль не осев. В таблице 2 показаны условия проведения опытов.

Таблица 2 – Условия проведения опыта

№ серия опытов	Скорость потока воды, $u_{ж}$, м/с	Соотношение скоростей потоков воды, $u_{в}/u_{ж}$, %	Диаметр частиц, $d_{ч}$, м
1	0,010	0,33 ~ 2	0,0002
2	0,015		
3	0,020		
4	0,025		

На рисунке 7 представлены результаты эффективности осаждения. По мере увеличения скорости увлекаемого потока во всех рассмотренных случаях наблюдался рост эффективности осаждения до предельного значения, после которого дальнейшее увеличение приводило к снижению степени очистки. По мере увеличения расхода очищаемой воды степень очистки ожидаемо снижалась в диапазоне от 15,2 до 20,5 % (рисунок 8).

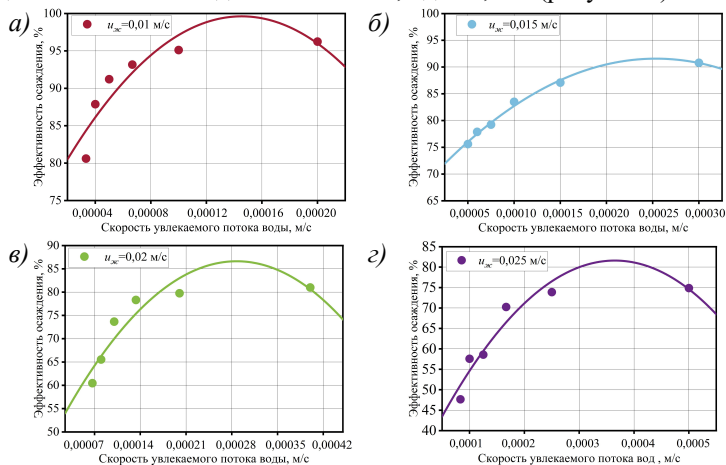


Рисунок 7 – Зависимость эффективности осаждения взвеси от скорости увлекаемого потока воды: а) $u_{ж} = 0,01$ м/с; б) $u_{ж} = 0,015$ м/с; в) $u_{ж} = 0,02$ м/с; з) $u_{ж} = 0,025$ м/с

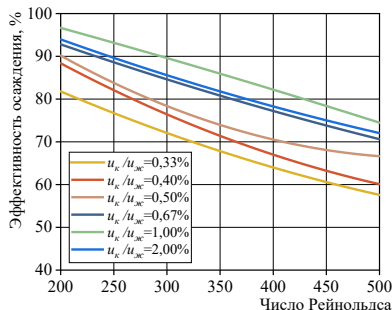


Рисунок 8 – Зависимость между эффективностью осаждения и числом Рейнольдса

Для дальнейшего анализа выбирались точки данных с эффективностью осаждения более 80 %. На основе этих результатов определялось оптимальное соотношение скоростей потока воды в канале движения сточных вод и в канале движения осадка (рисунок 9).

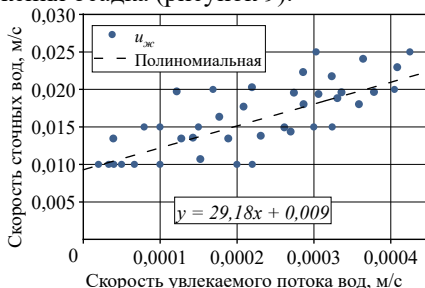


Рисунок 9 – Взаимосвязь между скоростью потока сточных вод $u_{ж}$ и скоростью увлекаемого потока воды $u_{к}$ при эффективности очистки более 80 %

При работе тонкослойного модуля новой конструкции зависимость между скоростью потока в канале движения сточных вод и скоростью увлекаемого потока в канале движения осадка описывается следующим уравнением с учетом достижения эффекта очистки 80 %:

$$u_{ж} = 29,18 u_{к} + 0,009 \quad (6)$$

3. Зависимости эффективности осаждения взвешенных частиц от скорости потока и площади отверстий в разделительных пластинах модуля новой конструкции.

Поскольку в экспериментальных условиях достаточно сложно оценить распределение концентраций взвешенных частиц в тонкослойном модуле, то для более детального рассмотрения структуры потока вблизи отверстий имеет смысл провести моделирование в программе конечно-элементного анализа. Кроме этого, математическая модель позволит оценить работу нового тонкослойного модуля в широком диапазоне геометрических характе-

ристик. С этой целью в ANSYS FLUENT была создана тонкостенная модульная конструкция, идентичная, ранее рассмотренной, лабораторной модели. На рисунке 10 показаны граничные условия численной модели.

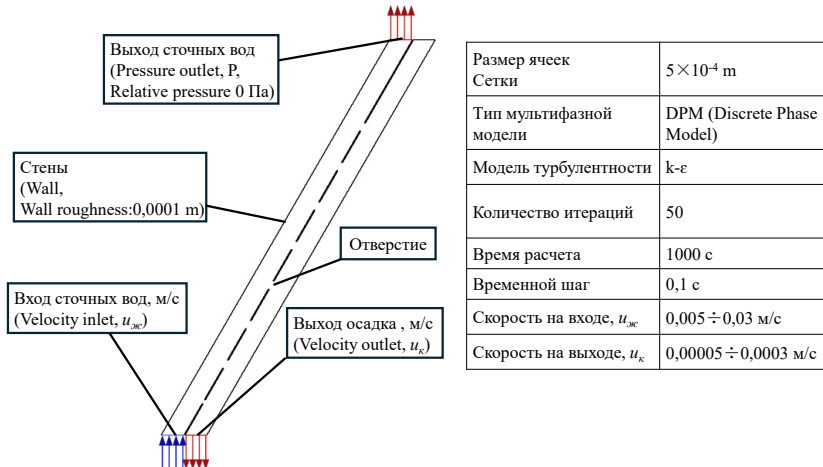


Рисунок 10 – Математическая модель нового тонкослойного модуля, граничные условия и параметры моделирования

Результаты сравнения результатов математического моделирования и лабораторного эксперимента представлено на рисунке 11. График показывает, что расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются, отражая общую закономерность снижения эффективности очистки по мере увеличения производительности сооружения. Расхождение результатов эксперимента и модели попадает в диапазон от 0,67 до 1,26 %. Таким образом, можно отметить достоверность результатов вычислений, полученных с помощью программного пакета ANSYS FLUENT для тонкослойного модуля.

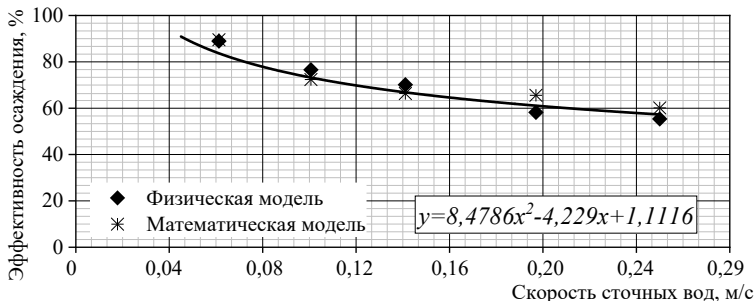


Рисунок 11 – Зависимость эффективности осаждения взвешенных частиц от скорости сточных вод

Для оценки траектории движения частиц и эффективности работы тонкослойного модуля также выполнялась серия модельных расчетов. На рисунке 12 показано распределение осадка внутри нового тонкослойного модуля в разные моменты времени при входной скорости потока $u_{ж} = 0,005$ м/с. Красная зона соответствует максимальной концентрации частиц.

На ранней стадии осаждения (рисунок 12 а, б) осадок сосредоточен в нижней части модуля; значительная его доля попадает в канал для осадка. В последующие моменты времени (рисунок 12 в–е) наблюдается подъем частиц вверх по верхнему каналу. При этом часть взвеси частично осаждается и через отверстия в стенке попадает в канал осадка. Из общего количества запущенных частиц ($N=30\,000$ шт.) в тонкослойном модуле было задержано 24 778 шт.

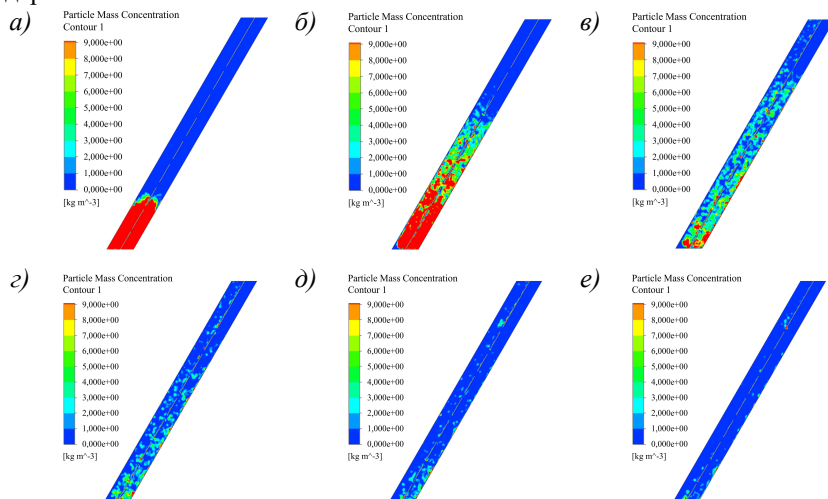


Рисунок 12 – Концентрация частиц в новом тонкослойном модуле при скорости $u_{ж} = 0,005$ м/с в момент времени: а) $t=120$ c; б) $t=280$ c; в) $t=440$ c; г) $t=600$ c; д) $t=760$ c; е) $t=920$ c

На рисунке 13 представлено распределение турбулентной кинетической энергии внутри тонкослойного модуля. Анализ данных показывает, что на начальной стадии осаждения (рисунок 13 а) течение характеризуется высокой интенсивностью турбулентности, при этом зоны с высокой энергией широко распределены как в канале движения сточных вод, так и в канале движения осадка. Со временем наблюдается значительная диссипация турбулентности, и течение постепенно переходит в квазистационарное состояние (рисунок 13 б). В стабильном состоянии (рисунок 13 в) высокая турбулентная кинетическая энергия сосредоточена только в канале движения сточных вод, в то время как в канале движения осадка устойчиво поддерживается низкий уровень турбулентной кинетической энергии. Данная

смена режима течения между каналами позволяет создать благоприятные условия для улавливания частиц.

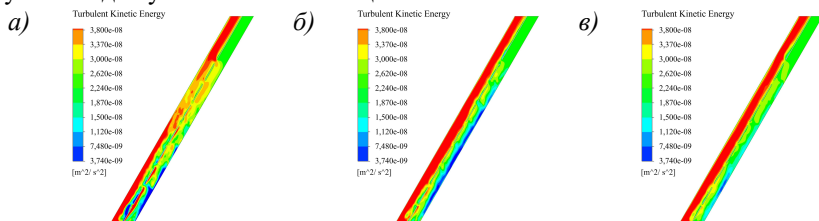


Рисунок 13 – Турбулентная кинетическая энергия в тонкослойных модулях:

а) $t=280$ с; б) $t=600$ с; в) $t=920$ с

На рисунке 14 показана зависимость между количеством оседающих частиц, эффективностью и скоростью потока воды между наклонными пластинами в моделях. Из рисунка видно, что количество осевших частиц и эффективность осаждения в обеих моделях достигают максимума при скорости потока 0,005 м/с. При дальнейшем увеличении скорости потока количество осевших частиц и эффективность снижались. Следует отметить, что новый тонкослойный модуль превосходит классический при различных скоростях потока, увеличивая эффективность осаждения в среднем на 31,5 %.

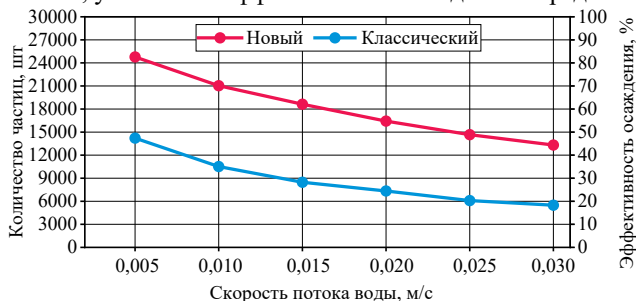


Рисунок 14 – Зависимость между скоростью потока воды, количеством осевших частиц и эффективностью осаждения

Теоретически, с уменьшением диаметра частиц, эффективность осаждения снижается в связи с уменьшением массы и инерции. В данном исследовании была проведена статистическая обработка осаждения частиц различных диаметров в математической модели.

Из рисунка 15 видно, что частицы большего диаметра демонстрируют более высокую эффективность осаждения как в новом, так и в классическом тонкослойных модулях. Тем не менее, стоит отметить, что новый тонкослойный модуль демонстрирует лучшую эффективность осаждения по сравнению с классическим для частиц диаметром менее 200 мкм, независимо от скорости потока. Лишь в случае возрастания скорости потока загрязненной воды до 0,03 м/с происходит значительное снижение количества задержанных частиц (диаметром 50 мкм) в новом модуле.

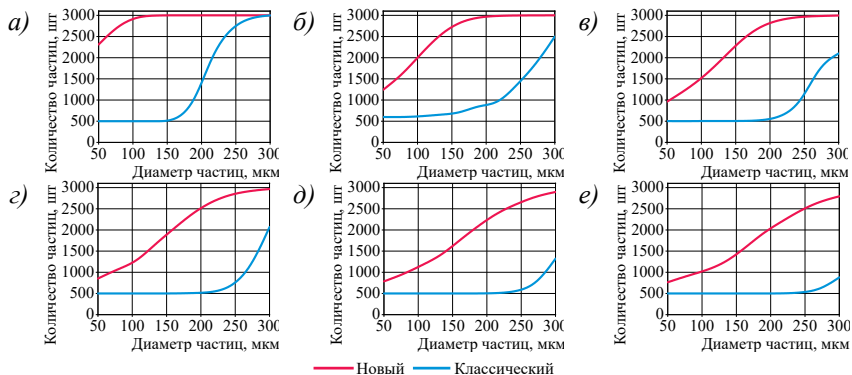


Рисунок 15 – Зависимость количества осажженных частиц от диаметра частиц при различной скорости потока: а) 0,005 м/с; б) 0,010 м/с; в) 0,015 м/с; г) 0,020 м/с; д) 0,025 м/с; е) 0,030 м/с

Далее с помощью моделирования были получены зависимости между отношением площади, занимаемой отверстиями к площади пластины – $s\%$, соотношением скоростей основного и увлекаемого потока – $u\%$ и эффективностью осаждения. Для расчета использовались частицы диаметром 50 – 300 мкм.

На рисунке 16 показаны поверхности, полученные в результате обработки результатов расчетов математического моделирования. Результаты показывают, что эффективность осаждения сначала увеличивается, а потом уменьшается с увеличением соотношения площадей. При увеличении соотношения скоростей основного и увлекаемого потока наблюдается аналогичная закономерность. Максимальная эффективность осаждения соответствует условию 10%-ной площади отверстий и величиной скорости увлекаемого потока в 1 % от скорости основного.

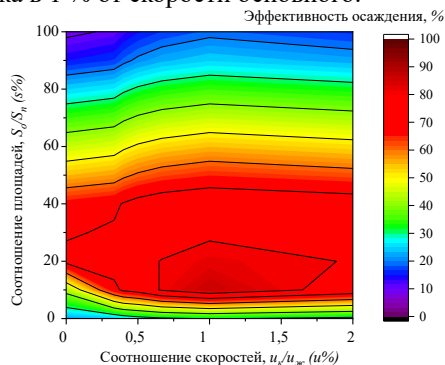


Рисунок 16 – Зависимость эффективности осаждения при различных соотношениях площадей $s\%$ и соотношениях скоростей $u\%$

На рисунке 17 показаны линии тока и поле локальных скоростей потока в каналах движения воды и осадка для варианта средней скорости потока сточных вод $u_{ж} = 0,03$ м/с. Из рисунка видно, что скорость движения частиц в канале осадка значительно ниже, чем в канале сточных вод. Благодаря отверстиям в канале осадка образуются крупные вихри, которые обеспечивают увлечение взвешенных частиц в канал осадка. Размер отверстия влияет на скорость движения частиц, что напрямую связано с эффективностью осаждения. Чрезмерное увеличение отверстий приводит к снижению скорости эжектирования и ухудшению эффективности улавливания частиц.

В процессе осаждения скатывающаяся по пластине частица может быть вторично подхвачена двигающимся потоком. Использование увлекающих отверстий позволит исключить этот процесс за счет захвата частиц, двигающихся вместе с восходящим потоком и частиц, скатывающихся по пластине вниз.

В идеализированных условиях моделирования, при наличии в потоке воды только взвешенных частиц с диапазоном диаметров от 50 до 300 мкм, не взаимодействующих друг с другом, максимальная эффективность осаждения может быть достигнута при использовании новой конструкции модуля с площадью отверстий увлекаемого потока, составляющей 10 % от общей площади пластины.

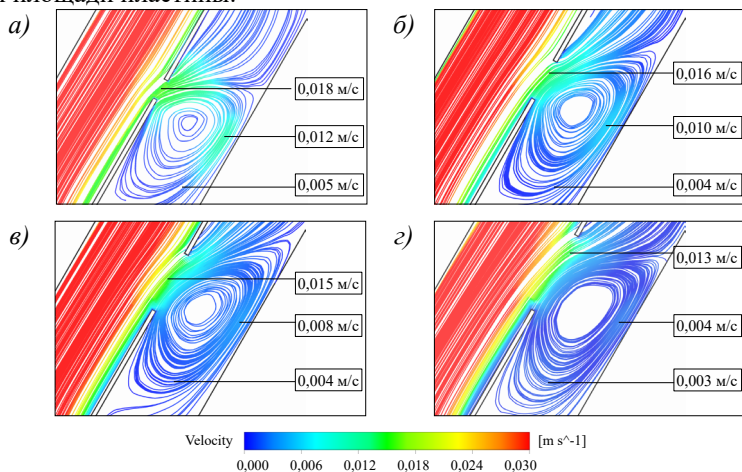


Рисунок 17 – Скорость и траектория движения частиц: а) 10 %; б) 20 %; в) 30 %; з) 40 %

4. Рекомендации по назначению характеристик тонкослойного модуля. Результаты испытания по очистке сточных вод. Оценка экономического эффекта применения тонкослойного модуля.

Для обеспечения экономической выгоды объем и стоимость отстойника должны быть минимально возможными при выполнении условия максимальной эффективности очистки. Кроме этого, необходимо обеспечить надежную работу сооружения и простоту обслуживания. С целью оптимизации конструкции инженерами предусматривается максимально плотная установка тонкослойных модулей. Для увлекаемого потока необходимо учесть рекомендуемое соотношение площади отверстий к площади наклонной пластины. Необходимо расположить отверстия равномерно по всей поверхности пластины. Площадь отверстий можно рассчитать, как 10 % от площади пластины. В таблице 3 приведены рекомендуемые диаметры отверстий и количество отверстий для наклонных пластин, при обеспечении эффективности очистки выше 80 %.

Таблица 3 – Рекомендуемое значение d_o

Размеры пластины (длина×ширина, м)	0,8×0,5	1×0,6	1×0,75	1,2×0,6	1,2×0,8	1,5×0,75	2,0×1,0
Диаметр отверстия, d_o , м	0,043	0,047	0,036	0,041	0,040	0,047	0,039
Количество отверстий, шт.	28	35	72	55	77	64	171

Скорость увлекаемого потока в канале движение осадка определяется по уравнению (6) при известной скорости потока сточных вод. В таблице 4 приведены рекомендуемые скорости увлечения воды с учетом рекомендуемого диапазона скорости сточных вод в тонкослойном модуле.

Таблица 4 – Величина скорости увлекаемого потока u_k для $u_{ж} = 0,01 - 0,03$ м/с

Скорость потока загрязненной воды, $u_{ж}$, м/с	0,010	0,015	0,020	0,025	0,030
Скорость увлекаемого потока воды, u_k , м/с	$3 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-4}$

Для испытания тонкослойного модуля на сточной воде применялась полупроизводственная установка, которая показана на рисунках 18,19. Емкость отстойника и тонкослойный модуль выполнены из ориентированно-стружечной плиты (ОСП-3) толщиной 11 мм, внутренняя поверхность дополнительно защищена гидроизоляционным покрытием. Габаритные размеры модуля составляли: 1900×1000×1000 мм (длина×ширина×высота). Межпластинчатое расстояние принималось равным 50 мм; ширина входного канала равнялась 250 мм, а выходного – 200 мм. Для обеспечения эффекта увлекаемого потока в пластине предусматривалось 9 рядов отверстий диаметром 0,032 м. Для обеспечения требуемого расхода воды к каналу осадка осуществлялось подключение трубопровода диаметром 25 мм с насосом.

Кроме емкости отстойника производственная установка включала накопительный резервуар с мешалкой, резервуар очищенной воды и резервуар осадка (рисунок 19). В приемном резервуаре с мешалкой обеспечива-

лось приготовление производственных сточных вод. Для эксперимента использовались сточные воды предприятия пищевой промышленности. Из накопительного резервуара насосом сточная вода подавалась в распределительный канал отстойника, проходила процесс отстаивания и удалялась самотеком в резервуар очищенной воды.



Рисунок 18 – Фотографии полупроизводственной установки отстойника с тонкослойным модулем новой конструкции

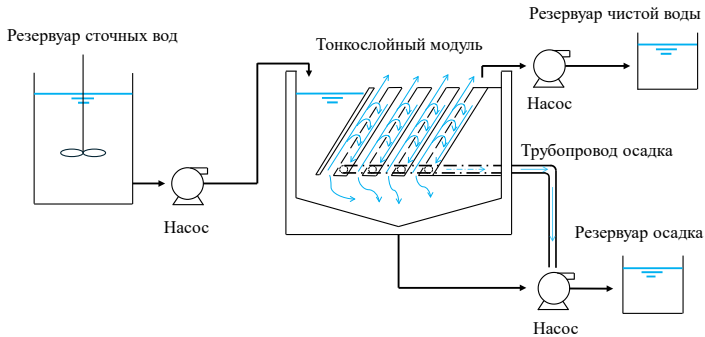


Рисунок 19 – Схема полупроизводственной установки отстойника с тонкослойным модулем новой конструкции

В ходе эксперимента выполнялась оценка отстаивания сточных вод в трех вариантах отстойника: без тонкослойного модуля, с классическим тонкослойным модулем и с тонкослойным модулем новой конструкции. Концентрация взвешенных веществ фиксировалась в приемном резервуаре сточных вод и в резервуаре очищенной воды, что позволило вычислить количество взвешенных веществ, осевших в отстойнике.

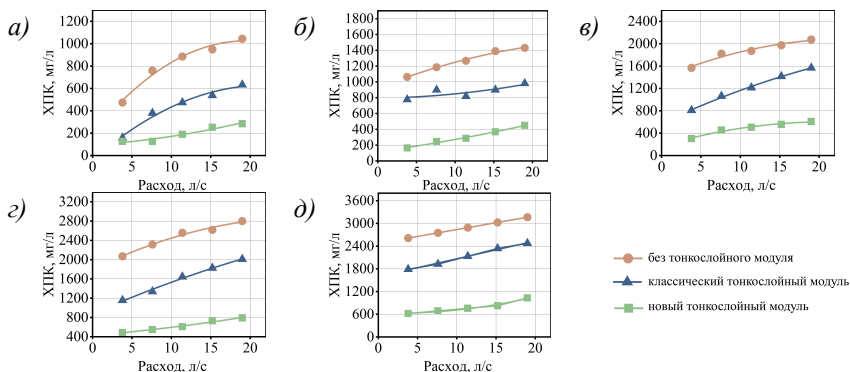
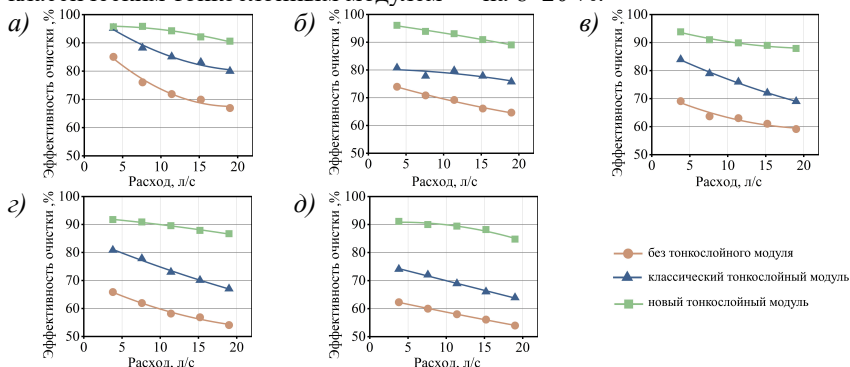
Опыты были разделены на пять серий в зависимости от исходной концентрации взвешенных веществ в сточной воде. Параметры этих серий представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Настройки экспериментов для каждой серии

№ серия опытов	Концентрация входящих взвешенных веществ, мг/л	ХПК, мг/л	Расход, л/с	Время измерения, мин.
1	2000	3163	3,8 ~ 19,0	30
2	3000	4087		
3	4000	5058		
4	5000	6086		
5	6000	6878		

Результаты экспериментов показаны на рисунках 20,21. На графиках отражается зависимость эффективности очистки взвешенных веществ и ХПК в течении времени эксперимента для различных конструкций отстойника.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при исходной концентрации взвешенных веществ от 2000 до 6000 мг/л использование тонкослойных модулей в отстойниках способствует существенному повышению эффективности очистки. По сравнению с отстойником без тонкослойного модуля эффективность очистки повышается на 20–31 %, а по сравнению с классическим тонкослойным модулем — на 8–20 %.



Стоимость очистки рассчитывается как удельный показатель на единицу объема очищенной воды (1 м³). Затраты на очистку 1 м³ сточных вод с использованием классического модуля составили 3,71 руб., тогда как при эксплуатации усовершенствованного модуля данный показатель снижается

до 3,11 руб. Снижение затрат на 0,6 руб. на каждый кубический метр сточных вод демонстрирует повышение экономической эффективности предлагаемого решения. Например, для станции мощностью 50 тыс. м³/сут. эксплуатационные расходы при применении новой конструкции тонкослойного отстойника снизятся на 10,95 млн руб/год.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Проведен системный анализ процессов осаждения и движения частиц в тонкослойном модуле, на основании которого разработана гипотеза о новой схеме функционирования модуля, исключающей накопление взвеси на стенке пластины и интенсификации процесса удаления частиц из межпластиночного пространства модуля. Разработана новая конструкция тонкослойного модуля, предусматривающая устройство канала движения сточных вод и канала отведения осадка, разделенных перфорированной пластиной.

2. Разработана теоретическая модель траектории движения взвешенной частицы в межпластиночном пространстве с учетом воздействия на нее силы увлекающего потока воды, которая показала возможность повышения эффективности осаждения.

3. На основании данных лабораторного эксперимента установлена зависимость между скоростью потока сточных вод и скоростью увлекающего потока: $u_{\text{ж}} = 29,18u_{\text{к}} + 0,009$, а также проведена верификация численной модели тонкослойного модуля (ANSYS FLUENT), описывающей взаимодействие водного потока с частицами различного размера. Расхождение результатов эксперимента и расчета составило от 0,67 до 1,26 %, что подтвердило корректность и надежность модели.

4. С помощью математической модели ANSYS FLUENT получены корреляционные зависимости между эффективностью осаждения взвеси, соотношением скоростей основного и увлекаемого потоков, а также площадью, занимаемой отверстиями на пластине модуля. Наилучшее соотношение скоростей потоков составляет 1 %. Установлено, что при соотношении площади отверстий к площади пластин 10 % достигается наилучший эффект осаждения, применимый для частиц различного диаметра.

5. С помощью полупроизводственного эксперимента на сточной воде подтверждено преимущество новой конструкции модуля в повышении эффективности осаждения частиц на 8–20 % по сравнению с классической конструкцией модуля.

6. Разработаны рекомендации для назначения геометрических и гидравлических параметров нового модуля, при обеспечении эффективности очистки выше 80 %.

7. Проведена экономическая оценка применения нового тонкослойного модуля в процессе очистки сточных вод. Сравнительный анализ эксплуатационных затрат показал экономию 0,6 руб. при очистке 1 м³ сточных вод по сравнению с классической конструкцией.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в расширении области применения нового тонкослойного модуля для условий прямо-точного и поперечного движения потока сточных вод.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. **Юй Ш.** Исследование эффективности очистки тонкослойных модулей различной конструкции / Ю. Шуайсянь, Е. Л. Терехова, В. М. Васильев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2024. – № 4(784). – С. 128-136. – DOI: 10.32683/0536-1052-2024-784-4-128-136. (0,54 п.л.).

2. **Юй Ш.** Оценка эффективности осаждения в тонкослойном модуле / Ш. Юй, С. В. Федоров, Ю. А. Феофанов, Н. А. Черников // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2025. – № 4(796). – С. 109-119. – DOI: 10.32683/0536-1052-2025-796-4-109-119. (0,61 п.л.).

3. **Юй Ш.** Моделирование осаждения частиц в тонкослойном модуле / Ш. Юй, С. В. Федоров // Вестник гражданских инженеров. – 2025. – № 4(111). – С. 108-116. – DOI: 10.23968/1999-5571-2025-22-4-108-116. (0,60 п.л.).

4. **Юй Ш.** Исследование эффективности осаждения частиц в тонкослойном модуле / Ш. Юй, С. В. Федоров, Ю. А. Феофанов [и др.] // Инновации и инвестиции. – 2025. – № 10. – С. 509-512. (0,69 п.л.).

5. **Юй Ш.** Влияние конструкции тонкослойного модуля на эффективность осаждения // Промышленное и гражданское строительство. – 2026. – № 1. – С. 56-62. – DOI: 10.33622/0869-7019.2026.01.56-62. (0,64 п.л.).

6. **Юй Ш.** Испытание тонкослойного модуля новой конструкции для очистки сточных вод с высокой концентрацией взвешенных веществ // Инновации и инвестиции. – 2026. – № 10. (в печати) (0,45 п.л.).

Статьи в журналах, входящих в Scopus

7. **Yu Sh.** Comparison of the Efficiency of Lamella Modules with Various Designs Based on Numerical Modeling / Sh. Yu, S. V. Fedorov // Lecture Notes in Civil Engineering. Vol 565. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. – Pp. 405-414. – DOI: 10.1007/978-3-031-80482-3_39. (0,47 п.л.).

Статьи в других изданиях

8. **Юй Ш.** Исследование двухуровневого тонкослойного модуля для очистки сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности / Ш. Юй, С. В. Федоров // Инженерные системы и городское хозяйство: Материалы Национальной (всероссийской) научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 20–24 марта 2023 года. – СПб.: СПбГАСУ, 2023. – С. 79-85. (0,22 п.л.).

9. **Юй Ш.** Моделирование осаждения частиц в тонкослойном модуле / Ш. Юй // Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве : Сборник материалов II Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 24–28 марта 2025 года. – СПб.: СПбГАСУ, 2025. – С. 54-63. (0,33 п.л.).

Компьютерная верстка *О. Н. Комиссаровой*

Подписано к печати 09.10.2026. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 107.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А