

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский  
государственный архитектурно-строительный университет»

*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

**Диссертация**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

Кандидат технических наук,

Доцент Федоров, С. В.

Санкт-Петербург – 2026 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....                                                                                                     | 4  |
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                              | 7  |
| ГЛАВА 1 ОТСТОЙНИКИ С ТОНКОСЛОЙНЫМИ МОДУЛЯМИ.....                                                                                            | 12 |
| 1.1 Осаждение взвешенных частиц .....                                                                                                       | 12 |
| 1.2 Применение тонкослойных модулей .....                                                                                                   | 14 |
| 1.3 Существующие конструкции тонкослойных модулей .....                                                                                     | 20 |
| 1.4 Проблемы эксплуатации тонкослойных модулей .....                                                                                        | 25 |
| 1.5 Теория осаждения взвешенных частиц .....                                                                                                | 27 |
| 1.5.1 Типы процесса осаждения .....                                                                                                         | 27 |
| 1.5.2 Теория тонкослойного отстаивания .....                                                                                                | 33 |
| 1.6 Силы, действующие на осаждающуюся частицу .....                                                                                         | 35 |
| 1.7 Выводы .....                                                                                                                            | 42 |
| ГЛАВА 2 ТОНКОСЛОЙНЫЙ МОДУЛЬ С ЭФФЕКТОМ УВЛЕКАНИЯ<br>ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ .....                                                                 | 44 |
| 2.1 Конструкция тонкослойного модуля .....                                                                                                  | 44 |
| 2.2 Теоретические зависимости движения частиц в новых тонкослойных<br>модулях .....                                                         | 47 |
| 2.3 Выводы .....                                                                                                                            | 50 |
| ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ<br>ХАРАКТЕРИСТИК НОВЫХ ТОНКОСЛОЙНЫХ МОДУЛЕЙ .....                                                    | 52 |
| 3.1 Физическое моделирование тонкослойного модуля .....                                                                                     | 52 |
| 3.2 Численное моделирование тонкослойных модулей .....                                                                                      | 62 |
| 3.2.1 Проверка конечно-элементной модели тонкослойного модуля.....                                                                          | 66 |
| 3.2.2 Результаты математического моделирования .....                                                                                        | 68 |
| 3.3 Выводы .....                                                                                                                            | 86 |
| ГЛАВА 4 ПОЛУПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИСПЫТАНИЕ НОВОГО<br>ТОНКОСЛОЙНОГО МОДУЛЯ, РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ<br>ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ..... | 87 |

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1 Полупроизводственный эксперимент .....                                      | 87  |
| 4.1.1 Характеристики установки.....                                             | 87  |
| 4.1.2 Планирование эксперимента.....                                            | 89  |
| 4.1.3 Анализ экспериментальных результатов .....                                | 90  |
| 4.2 Методика расчета геометрических параметров тонкослойных<br>модулей.....     | 92  |
| 4.3 Экономическое обоснование использования нового тонкослойного<br>модуля..... | 96  |
| 4.4 Выводы .....                                                                | 99  |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                | 100 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....                                                         | 103 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А .....                                                              | 122 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....                                                               | 124 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В .....                                                              | 130 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....                                                              | 144 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....                                                              | 154 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....                                                               | 155 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....                                                               | 156 |

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$Q$  - общий расход сточных вод, поступающий на очистку  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$A$  - площадь поверхности отстойника,  $\text{м}^2$ ;

$q$  - удельный расход сточных вод,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;

$\mu$  - динамическая вязкость жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$g$  - ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$\theta$  - угол наклона пластин, град.;

$E$  - эффективность осаждения, %;

$Re$  - число Рейнольдса;

$t$  - время движения частиц, с;

$H$  - высота тонкослойного модуля, м;

$B$  - ширина тонкослойного модуля, м;

$b$  - расстояние между пластинами, м;

$L$  - длина тонкослойного модуля, м;

$a$  - ускорение частиц за счет увлечения потоком воды, отводимого в межпластиночное пространство для отвода осадка,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$P$  - статическое давление, Па;

$k$  - энергия турбулентного потока;

$\varepsilon$  - коэффициент рассеивания энергии турбулентности;

$U$  и  $V$  - обозначают средние компоненты скорости в направлениях  $X$  и  $Y$  соответственно;

$M$  - массовый расход увлекаемой воды,  $\text{кг}/\text{с}$ ;

$N$  - общее количество частиц, шт.;

$H_o$  - высота отстойника, м;

$r_c$  - радиус частиц, м;

$F_g$  - вес частицы, Н;

$F_b$  - сила Архимеда, действующая на частицу, Н;

$F_d$  - сила сопротивления жидкости, Н;

$F_a$  - сила воздействия увлекающего потока воды на частицы, Н;

$\rho_{ж}$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{ч}$  - плотность взвешенных частиц, кг/м<sup>3</sup>;

$u_{ж}$  - средняя скорость потока воды в межплиточном пространстве, скорость движения потока жидкости, м/с;

$u_{ч}$  - теоретическое значение скорости частиц (гидравлическая крупность), м/с;

$u_{ч}^*$  - экспериментальное значение скорости частиц, м/с;

$u_{к}$  - скорость потока воды, вытекающей из нижней части межпластиночного пространства для отвода осадка, м;

$d_{ч}$  - диаметр взвешенных частиц, мкм;

$r_{к}$  - радиус трубопровода, принимающего воду из нижней части межпластиночного пространства для отвода осадка, м;

$x_0, y_0$  - координаты начального положения частиц в модуле;

$C_D$  - коэффициент сопротивления;

$Q_{к}$  - расход увлекаемого потока, м<sup>3</sup>/с;

$V_{к}$  - объем воды в канале осадка, м<sup>3</sup>;

$\omega_{к}$  - сечение канала движения осадка, м<sup>2</sup>;

$m_{ч}$  - масса частицы, кг;

$L_{Re}$  - характерная длина (расстояние между пластинами), м;

$s\%$  - соотношение площади, занимаемой отверстиями к площади пластины, разделяющей канал движения потока и канал отведения осадка, %;

$u\%$  - соотношение скоростей, соотношение скорости потока сточных вод и увлекаемого потока, %;

$\mu_{eff}$  - коэффициент динамической вязкости;

$d_o$  - диаметр отверстий в разделительной пластине, м;

$N_i$  - количество частиц  $i$ -ой группы на выходе из модуля;

$M_{fi}$  - массовая доля частиц  $i$ -ой группы, %;

$\Delta_c$  - разница в концентрации взвешенных твердых частиц до и после очистки, мг/л;

- $h_l$  - потери напора на трение по длине канала, м;  
 $\Sigma h_m$  - сумма потерь напора на местные сопротивления, м;  
 $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения (определяется в зависимости от числа Рейнольдса  $Re$  и шероховатости материала пластин);  
 $D_h$  - гидравлический диаметр канала, м;  
 $\zeta_{вход}$  и  $\zeta_{выход}$  - коэффициенты местного сопротивления на входе и выходе из тонкослойного модуля;  
 $\zeta_k$  - коэффициент местного сопротивления перфорированной пластины;  
 $\Delta h_o$  - потери напора увлекаемого потока при прохождении через перфорированную пластину, м;  
 $h_c$  - общие потери напора в канале сточных вод, м;  
 $CRF$  - коэффициент восстановления капитала;  
 $K_{cp}$  - капитальные затраты, руб.;  
 $C_d$  - амортизационные отчисления, руб.;  
 $C_r$  - текущий ремонт, руб.;  
 $C_m$  - затраты на обслуживание модуля, руб.;  
 $N_m$  - количество работников, шт.;  
 $W$  - средняя месячная зарплата, руб.;  
 $C_u$  - неучтенные расходы, руб.;  
 $\gamma$  - коэффициент неучтенных затрат;  
 $N_z$  - количество дней работы в году;  
 $S_{op}$  - удельная стоимость очистки 1 м<sup>3</sup> воды, руб.;  
 $r$  - коэффициент текущего ремонта;  
 $n$  - срок службы отстойника, лет;  
 $i$  - ставка дисконтирования.

## ВВЕДЕНИЕ

**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. С целью обеспечения экологической безопасности окружающей среды необходимо улучшать и совершенствовать данную технологию для обеспечения высокого эффекта очистки и достижения низких 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, K. Hirom, T.T. Devi, M. P. Bhorkar, P. B. Nagarnaik, Sh. Juraev, A. Akramov, A. Abdurazzokov, U. Pathidinova, Chuan Pan, Weichao Ma, Chunran Zhang, Minghao Lu и др.

**Гипотеза.** Удаление взвешенных частиц с помощью силы потока, отводимого в канал удаления осадка.

**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. Апробация 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 современного 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 страницах основного текста и 37 страницах приложений, содержит 13 таблиц, 49 рисунок и 60 формул.

## **ГЛАВА 1 ОТСТОЙНИКИ С ТОНКОСЛОЙНЫМИ МОДУЛЯМИ**

### **1.1 Осаждение взвешенных частиц**

Метод осаждения, являющийся одним из старейших и наиболее распространенных технологий в процессе водоочистки, имеет историю, уходящую корнями в древность. Еще в древних цивилизациях, таких как Ассирия, Египет, Империя Инков и Древний Рим, метод осаждения широко применялся для водоподготовки воды и очистки сточных вод [74, 75, 79, 126, 176]. Древние люди использовали принцип осаждения, удаляя взвешенные частицы из воды путем естественного оседания, что позволяло получать более чистую воду; эта древняя технология играла важную роль в социальном и экономическом развитии того времени.

С развитием науки и техники метод осаждения не потерял своей актуальности в области разделения твердых и жидких фаз, находя применение в различных отраслях, таких как энергетика, обогащение руд, медицина и здравоохранение, охрана окружающей среды, и превратился в широко распространенную и зрелую технологию [58, 122, 168, 1, 2]. Основной принцип метода осаждения заключается в использовании явления естественного оседания взвешенных частиц в воде под действием гравитационного поля, при котором снижение скорости потока воды позволяет частицам постепенно оседать на дно отстойника. Этот процесс не только прост в реализации, но и отличается простой конструкцией оборудования и низкими эксплуатационными затратами, что делает его наиболее распространенной и эффективной технологией разделения твердых и жидких фаз в инженерной практике. Оценка качества процесса осаждения зависит от эффективности разделения твердой и жидкой фазы. Повышение эффективности разделения является не только целью оптимизации технологии осаждения, но и ключевым фактором, обеспечивающим эффективность работы всей системы водоочистки и улучшение качества воды [3, 131, 139, 152, 160].

В современных технологиях водоподготовки на водоочистных станциях

используются крупные отстойники для производства питьевой воды для населения. Аналогично, на городских очистных сооружениях сточных вод используются отстойники для обработки образующихся сточных вод, которые затем сбрасываются в водоемы или используются повторно [55, 62, 110, 137, 161, 184, 23]. В процессе очистки основным фактором осаждения выступает значительное сокращение скорости потока по сравнению с условиями протекания в подводящем трубопроводе и последующее осаждение за счет гравитации. Снижение скорости потока позволяет частицам с плотностью, превышающей плотность воды, оседать на дно емкости. Осевшие частицы накапливаются на дне и, в зависимости от режимов эксплуатации, непрерывно или периодически удаляются, в то время как осветленная вода переливается через верх для дальнейшей обработки. К современным путям повышения эффективности осаждения можно отнести оптимизацию конструкции отстойника, а также использование дополнительных реагентов [53, 59, 134, 151, 190, 11, 9, 16].

Отстойники, применяемые на городских очистных сооружениях сточных вод, могут использоваться на этапах первичной и вторичной обработки [82, 100, 136, 164, 24]. В первичных отстойниках удаляются крупные частицы и органические вещества. Это помогает снизить органическую нагрузку в последующих процессах биологической очистки. Вторичные отстойники используются после процессов биологической очистки для удаления хлопков активного ила, которые содержат бактерии и другие микроорганизмы, принимавшие участие в деструкции органических соединений.

На городских водопроводных станциях отстойники обычно используются после процессов коагуляции и флокуляции для удаления флокул и снижения мутности перед фильтрацией и дезинфекцией воды, тем самым повышая эффективность системы фильтрации и обеспечивая безопасную питьевую воду [83, 104, 111, 135, 19, 25]. Таким образом, эффективность работы отстойников напрямую влияет на эффективность и качество воды всей системы водоподготовки, что делает их проектирование и эксплуатацию крайне важными аспектами для станций очистки.

## 1.2 Применение тонкослойных модулей

Появление теории тонкослойного осаждения позволило развивать технологию в сторону повышения эффективности очистки, снижения потребления ресурсов и уменьшения площади, занимаемой сооружениями. Теория позволяет оценить структурные параметры отстойников, такие как скорость потока, которая варьируется в диапазоне 0,2–0,5 м/ч [99]. Отстойник с тонкослойными модулями (рисунок 1.1), представляет собой емкость, снабженную многослойной пластинчатой конструкцией, которая позволяет послойно раздробить поток воды, обеспечив менее турбулентное и хаотичное движение отдельных струй, а также значительно уменьшая глубину осаждения взвешенной частицы [73, 8]. Данное сооружение может быть не только отдельно стоящим, но и легко комбинироваться с другими технологическими процессами в зависимости от характеристик сточных вод [144, 7, 41]. Функционируя в сочетании с другими методами, как локальное очистное сооружение, особенно подходит для обработки сточных вод в условиях ограниченного пространства [142].

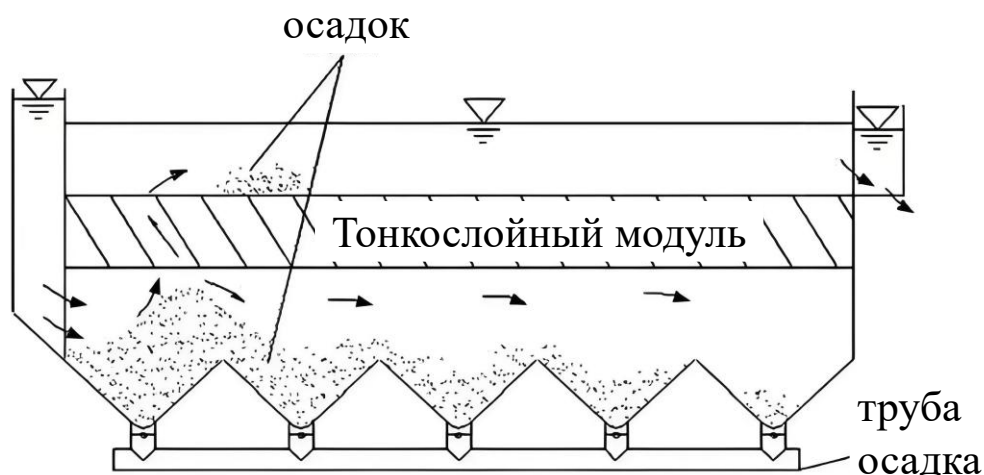


Рисунок 1.1 Схема отстойника с тонкослойным модулем

Конструкция тонкослойного модуля состоит из нескольких наклонных пластин (рисунок 1.2), угол наклона которых обычно находится в диапазоне от  $45^\circ$  до  $60^\circ$ , а расстояние между пластинами варьируется от 0,05 до 0,06 м [56, 76, 143]. Длина наклонных пластин в практике эксплуатации находится в диапазоне 1,0 – 1,2 м. Малое расстояние сокращает путь движения частицы, обеспечивая стабильность процесса

осаждения [93, 20]. Кроме этого, снижение турбулентности позволяет создать условия для сползания оседающих частиц в бункер отстойника. По сравнению с традиционными, отстойник с тонкослойными модулями увеличивает эффективную площадь осаждения в 3 - 5 раз [35] и сокращает время осаждения частиц в воде [145], позволяя увеличить эффективность очистки на 30 - 50% [132, 13, 14, 23].



Рисунок 1.2 Конструкция тонкослойного модуля

В зависимости от взаимного направления движения потока воды и частиц, можно выделить несколько вариантов функционирования тонкослойного модуля [27, 113, 114] (рисунок 1.3):

1. Прямоточное движение, при котором направление потока воды совпадает с направлением осаждения частиц.
2. Поперечное движение, при котором направление потока воды перпендикулярно направлению осаждения частиц.
3. Противоточное, при котором направление потока воды противоположно направлению осаждения частиц.

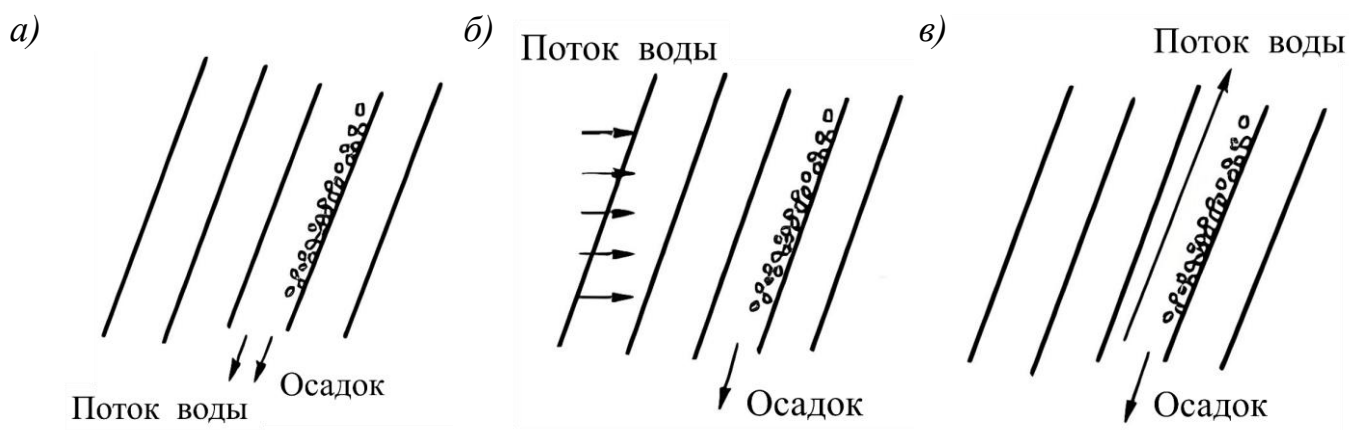


Рисунок 1.3 Схемы взаимного движения потока воды и взвешенных частиц в тонкослойном модуле

Учитывая существующие данные научных исследований и имеющийся на сегодняшний день опыт эксплуатации можно выделить следующие преимущества и недостатки, представленных схем функционирования модуля (таблица 1.1).

Таблица 1.1 Оценка вариантов функционирования тонкослойного модуля

| Схема функционирования                      | Достоинство                                                                                                                                                                                       | Недостаток                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Тонкослойный модуль с прямоточным движением | <b>Благоприятный гидродинамический режим,</b> характеризующийся минимальным риском вторичного перемешивания и взмучивания частиц [178].                                                           | <b>Снижение эффективности разделения:</b> из-за сонаправленного движения потока воды и частиц мелкие фракции (легко увлекаемые потоком) могут быть плохо отделены, что приводит к неполному осаждению и ухудшению качества очищенной воды [108]. |
|                                             | <b>Высокая надежность:</b> простота эксплуатации снижает вероятность отказов оборудования, продлевает срок его службы, уменьшает время простоя и повышает общую эффективность эксплуатации [183]. | <b>Повышенная склонность к засорению каналов в начальной (входной) зоне:</b> сочетание максимальной концентрации взвеси и резкого перераспределения скоростей на входе приводит к интенсивному осаждению частиц [67].                            |
|                                             |                                                                                                                                                                                                   | <b>Требуется большая поверхность пластин для</b>                                                                                                                                                                                                 |

|                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <b>достижения требуемого эффекта:</b> в сравнении с другими схемами площадь пластин увеличивается на 20-40% [10].                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Тонкослойным модулем с поперечным движением</b>    | <p><b>Увеличение эффективности осаждения по сравнению с прямоточной схемой:</b> поперечное осаждение частиц сокращает эффективную длину пути осаждения [43].</p> <p><b>Равномерное распределение концентрации взвеси на входе:</b> за счет распределения потока по всей ширине модуля снижается риск заиливания на входе [43].</p> <p><b>Использование практически всей осаждающей поверхности:</b> в межпластинчатом канале возникают локальные вихри, которые способствуют перемешиванию, выходу частиц из «основной струи» и увеличению вероятности контакта частицы с поверхностью пластины [96].</p> | <p><b>Неравномерное распределение потоков внутри сооружения:</b> конструкция требует точного гидравлического расчета или моделирования с целью исключения возникновения застойных зон [88].</p> <p><b>Подверженность локальному заиливанию:</b> в зонах пониженной скорости и изменения характера потока может возникать накопление осадка, которое гидравлически плохо удаляется, поскольку самоочищение выражено слабее, чем у противоточной схемы [182], что требует регулярной очистки и обслуживания, увеличивая эксплуатационные расходы.</p> <p><b>Более сложная конструкция сооружения:</b> для обеспечения эффективного осаждения отстойники с боковым потоком и наклонными пластинами требуют значительного объема, что увеличивает занимаемую площадь и стоимость [22].</p> |
| <b>Тонкослойным модулем с противоточным движением</b> | <p><b>Повышение эффективности осаждения:</b> за счет противоточного движения увеличивается относительная скорость осаждения и сокращается время пребывания частиц в воде [40], лучшее функционирование с частицами мелкой фракции [164].</p> <p><b>Широкая применимость:</b> отстойники с наклонными пластинами и встречным потоком подходят для очистки различных видов сточных вод, особенно в качестве первичных отстойников, эффективно удаляя крупные взвешенные частицы и снижая нагрузку на последующие этапы</p>                                                                                  | <p><b>Повторное взмучивание частиц:</b> встречное движение потока воды может приводить к взмучиванию сползающего по пластине слоя осадка [178].</p> <p><b>Повышенные эксплуатационные расходы:</b> наличие сильнозагрязненных сточных вод (например, высоковязкий ил с крупными хлопками) может привести к засорению модуля и снижению эффективности осаждения. Это требует регулярной очистки и обслуживания, что увеличивает</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

|  |                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                             |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | очистки [144].<br><br><b>Наличие саморегулирующегося режима:</b> при заиливании модуля восходящий поток создает достаточные касательные напряжения для смыва накопившегося осадка [85]. | эксплуатационные затраты [85].<br><br><b>Необходимость точной гидравлической балансировки всех каналов модуля:</b> неравномерность нагрузки приводит к локальному заиливанию и выносу загрязнений через чистые каналы [88]. |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Подводя итог рассмотренных схем работы тонкослойного модуля, можно составить следующую таблицу 1.2:

Таблица 1.2 - Схемы работы тонкослойного модуля

| Показатель                                      | Схема                                                                                   |                                                           |                                                                              |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|                                                 | Прямоточная                                                                             | Поперечная                                                | Противоточная                                                                |
| Движение частиц                                 | Вдоль потока (сонаправленно)                                                            | Поперек пластинам                                         | Встречное к потоку                                                           |
| Распределение взвеси                            | Неравномерное, осадок концентрируется у выхода                                          | Равномерно по ширине и длине модуля                       | Осадок концентрируется ближе к входу                                         |
| Эффективность использования поверхности пластин | Частичная                                                                               | Высокая для крупной и средней фракции                     | Высокая, в т.ч. для мелкой фракции взвеси                                    |
| Эффективность осаждения                         | Низкая<br>25-30%                                                                        | Средняя<br>28-40%                                         | Высокая<br>42-60%                                                            |
| Наличие самоочищения                            | отсутствует                                                                             | есть, слабое                                              | есть                                                                         |
| Степень компактности                            | низкая                                                                                  | высокая                                                   | средняя                                                                      |
| Сложность эксплуатации                          | низкая                                                                                  | средняя                                                   | высокая                                                                      |
| Сложность проектирования                        | низкая                                                                                  | средняя, необходимость оценки застойных зон               | высокая, необходимость гидравлической балансировки                           |
| Фракция взвешенных веществ                      | средняя-мелкая<br>>150 – 300 мкм                                                        | средняя – крупная, частично мелкая<br>100 – 150 мкм       | мелкая-средняя-крупная<br>(<50 – 100 мкм)                                    |
| Тип воды                                        | Сточные воды с высоким содержанием кварцевого песка и других минеральных примесей [127] | Дождевые воды; сточные воды химического производства [29] | Сточные воды целлюлозно-бумажной промышленности; Городские сточные воды [26] |

В настоящее время наиболее распространенной и широко применяемой конструкцией является конструкция с противоточной схемой. Данная схема функционирования позволяет получить наибольший эффект очистки и характеризуется стабильностью процесса осаждения [97, 109, 163, 193].

Отстойники с тонкослойными модулями появились еще в середине XX века, и зарекомендовали себя, как инновационная технология, позволяющая экономить пространство и значительно повысить эффективность осаждения взвеси [157]. Благодаря действию тонкослойных модулей, при прохождении потока воды через отстойник значительно снижается турбулентность потока, что уменьшает вероятность повторного взвешивания частиц и повышает эффект осаждения. Степень турбулентности снижается приблизительно на 30 - 37 % [140].

Для описания процесса емкость отстойника рассматривается идеализированной. Скорость потока во всех точках внутри отстойника одинакова, скорость осаждения частиц принимается неизменной в процессе осаждения, и когда частицы оседают на дно резервуара, считается, что вода очищена [105]. Суммарная площадь проекции пластин  $A_i$  в горизонтальном направлении является эффективной площадью осаждения, с учетом понижающего коэффициента использования площади  $\eta_A$  [61]:

$$A_{эф} = \eta_A \sum_{i=1}^N (A_i \cdot \cos \theta) \quad (1-1)$$

Важным параметром при расчете отстойника является удельный расход сточных вод, приведенный к единице площади пластин [85]:

$$q = \frac{Q}{A_{эф}} \quad (1-2)$$

Увеличение эффективной площади осаждения приводит к снижению средней скорости потока в межпластиночном пространстве, уменьшению касательных напряжений ( $Re \downarrow$ ), и получению квазиламинарного течения потока. Целью этой конструкции является обеспечение достаточного времени частицам для осаждения из воды [77].

Тонкослойные модули используются повсеместно, в существующих отстойниках большой производительности и в малых локальных очистных сооружениях, как интенсификатор осветления [87, 121]. Функционирование станций обычно характеризуется изменением нагрузки по загрязнениям и расходу воды, что, как правило, негативно сказывается на устойчивой работе сооружения и достижения теоретической эффективности очистки [101]. Данные в работах [86] свидетельствуют о эффективном удалении лишь 40-50% взвеси в процессе эксплуатации.

Учитывая важность роли отстойников в технологиях водоподготовки и очистки сточных вод, следует отметить актуальность развития научного направления по совершенствованию и улучшению технологии тонкослойного отстаивания с целью обеспечения стабильной и устойчивой работы сооружений [130].

### **1.3 Существующие конструкции тонкослойных модулей**

Основная цель повышения эффективности осаждения в тонкослойных модулях заключается в оптимизации конструкции. В традиционных конструкциях эта цель обычно достигается путем соответствующей регулировки расстояния, размеров и конфигурации тонкослойных модулей [106, 140, 173, 187, 18]. Однако, с непрерывным развитием процессов индустриализации и повышением требований к пропускной способности и эффективности, конструкция тонкослойных модулей постепенно становится более сложной и утонченной. В последние годы появилось множество инновационных конструкций тонкослойных модулей. Эти конструкции не только повышают эффективность и стабильность процесса осаждения частиц, но и значительно снижают эксплуатационные расходы. На рисунке 1.4 представлены технические решения с использованием тонкослойных модулей, применяемые в современной инженерной практике. Для сравнения на рисунке представлена классическая конструкция модуля (рисунок 1.4, *а*), которая, конечно, наиболее часто встречается в инженерной практике, а также конструкция с наклонными пластинами, дополненная вертикальными каналами на входе и выходе из модуля (рисунок 1.4, *б*), двухслойная конструкция с изменением наклона пластин (рисунок 1.4, *в*), а также

трехслойная конструкция с двойным изменением наклона пластин (рисунок 1.4, *г*) [96]. В рамках работы проводилась оценка эффективности работы этих конструкций с помощью конечно-элементного анализа [50, 51, 180].

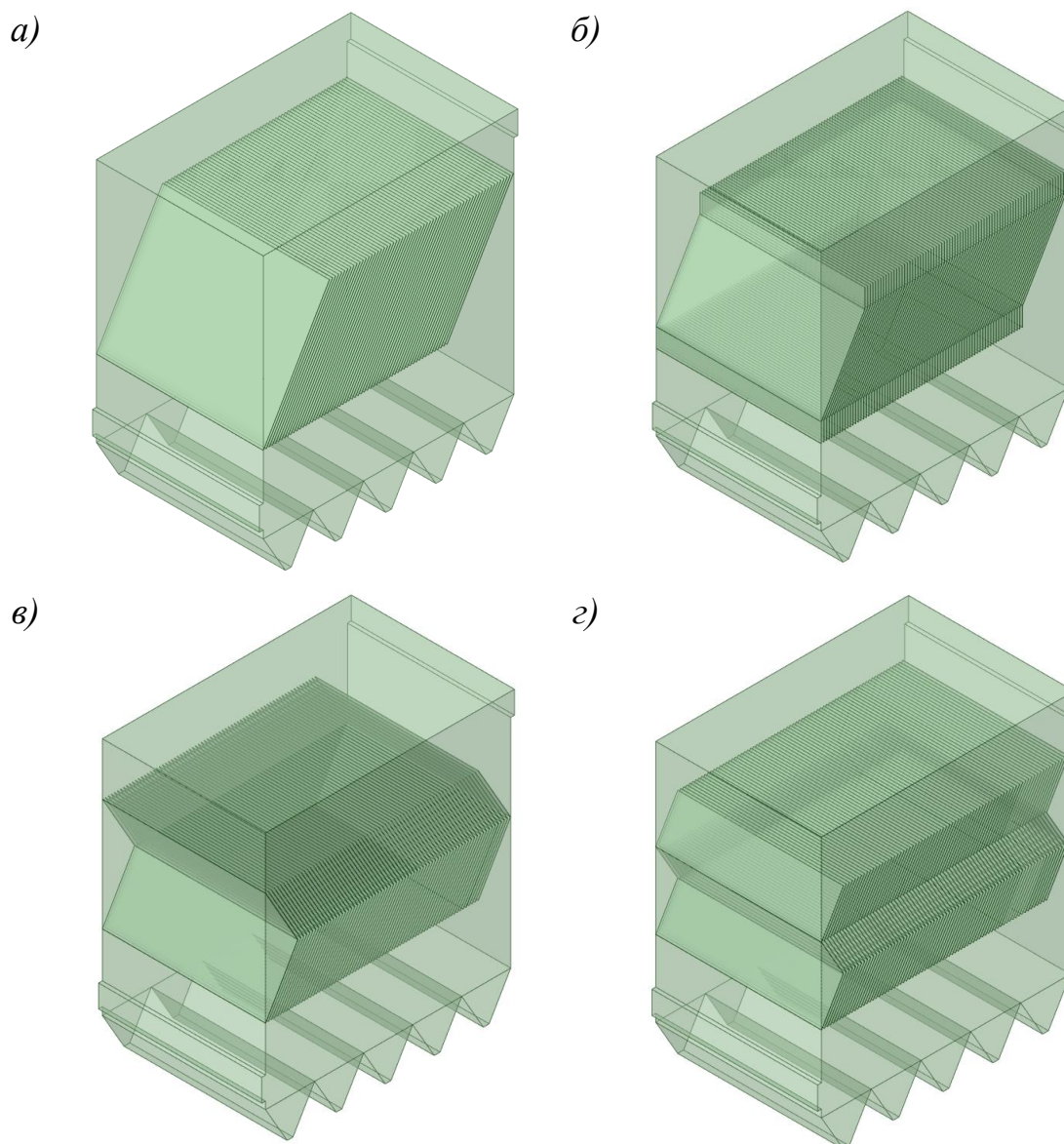


Рисунок 1.4 Варианты конструкции тонкослойного модуля с противоточной схемой функционирования

На рисунке 1.5 представлен график зависимости количества осажденных частиц от скорости потока воды в модели. На графике видно, что все рассмотренные конструкции, в большинстве случаев при различной производительности позволяют достичь эффекта осаждения взвешенных частиц более 50%. По мере уменьшения

скорости потока во входном трубопроводе, что соответствует снижению производительности, наблюдается тенденция к росту эффективности седиментации во всех конструкциях, особенно для частиц большего диаметра, что соответствует ожидаемому результату. С увеличением скорости движения потока происходит повышение степени турбулентности в отстойнике. В результате этого частицы, оседающие в тонкослойном модуле, могут быть повторно подхвачены потоком, что приводит к снижению эффективности очистки. Конструкции *а*, *б* и *в* продемонстрировали максимальную эффективность осаждения при скорости потока во входной трубе 0,0025 м/с, тогда как конструкция *г* достигла максимальной эффективности осаждения при скорости потока 0,0075 м/с [45].

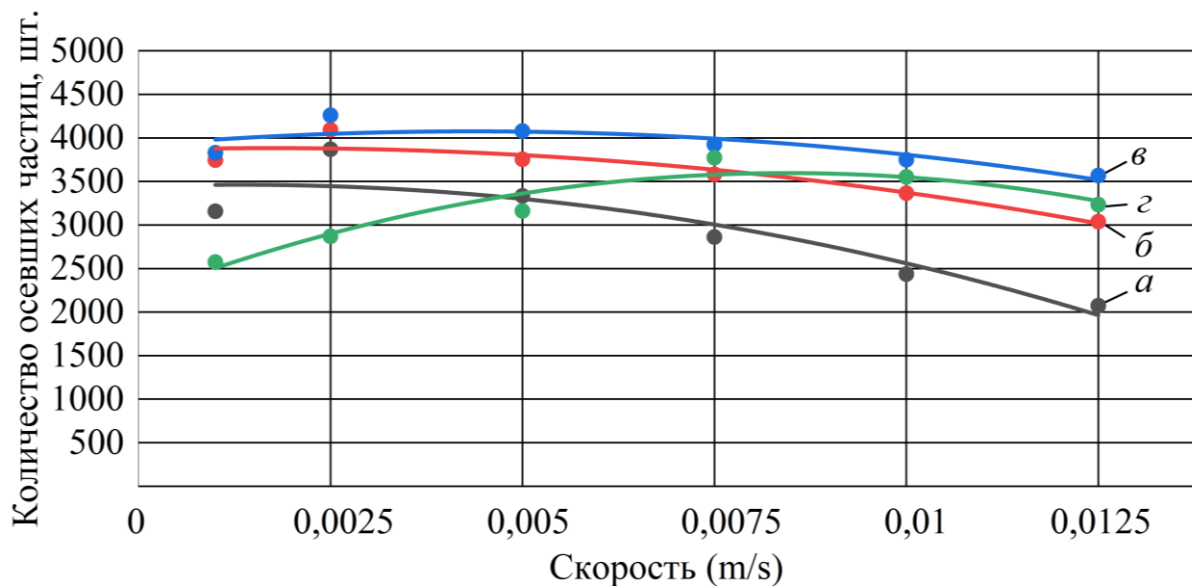


Рисунок 1.5 Зависимость между скоростью потока воды и количеством осажженных частиц

Кроме того, в данном исследовании проведена статистическая обработка данных по каждой конструкции с учетом количества осажженных частиц при различном диаметре (рисунок 1.6), что способствует более точной и наглядной оценке их осаждающего потенциала. Из рисунка видно, что распределение осаждения частиц в тонкослойных модулях различных конструкций схоже. Ожидается, для частиц большого диаметра наблюдается более высокая эффективность осаждения. Следует

отметить, что конструкция «в» демонстрирует превосходство в количестве осажженных частиц по сравнению с другими вариантами независимо от скорости входа, особенно для частиц с диаметром более 225 микрометров [49]. При скорости входа 0,0025 м/с наблюдается оптимальная эффективность осаждения.

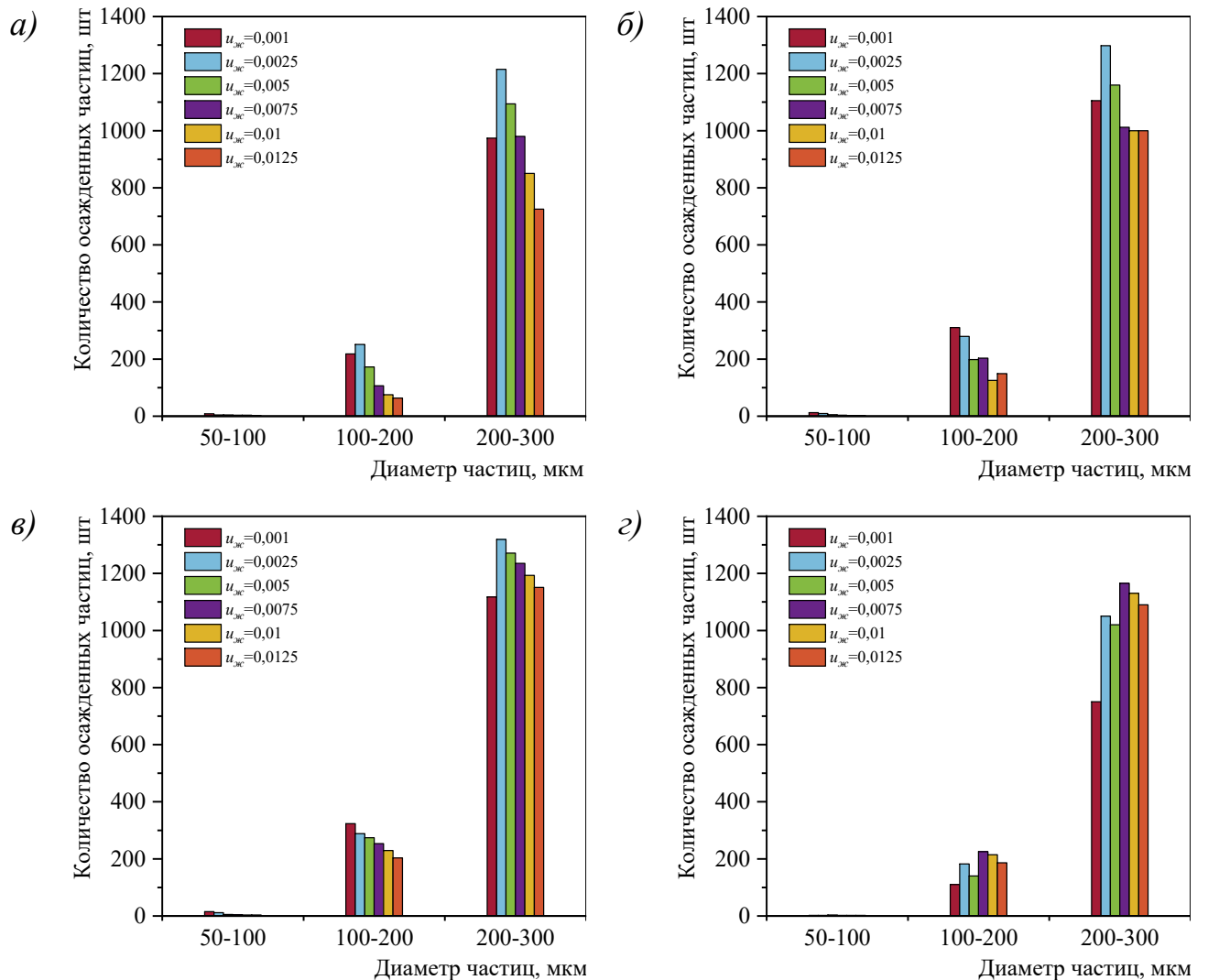


Рисунок 1.6 Зависимость количества осевших частиц от диаметра частиц

а) Конструкция а; б) Конструкция б; в) Конструкция в; г) Конструкция г

Высокая эффективность осаждения в двухслойном модуле требует детального рассмотрения траекторий движения частиц различной фракции (рисунок 1.7). На графике видно, что удержание частиц диаметром более 225 мкм обеспечивается в зоне поворота пластин. Возникновение местной потери напора играет определяющую роль в достижении высокой седиментации. Тем не менее, такой эффект может порождать

потенциальный риск заиливания участка поворота пластин крупными частицами после длительной эксплуатации, снижению производительности, вплоть до полной остановки работы системы.

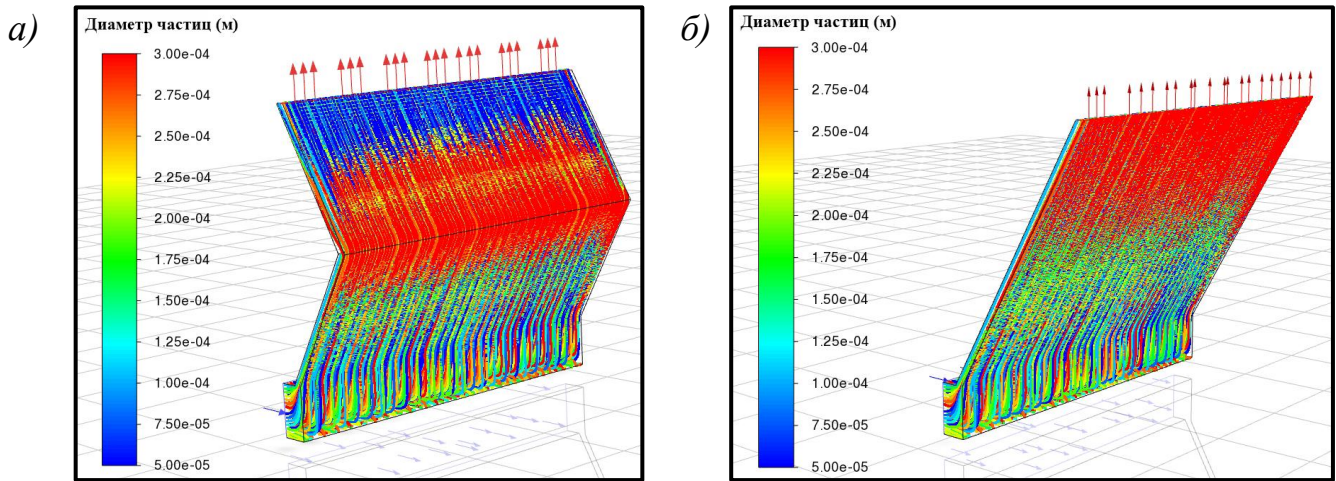


Рисунок 1.7 Траектория движения твердых частиц различной фракции при скорости

$$u_{жс} = 0,0025 \text{ м/с в момент времени}$$

а) двухслойный тонкослойный модуль; б) классический тонкослойный модуль

На рисунке 1.7 б показано осаждение частиц в классическом тонкослойном модуле. Как видно большая часть частиц, в том числе частицы крупной фракции, сосредоточены в зоне выхода потока из модуля, что обусловлено присутствием в этом месте границы резкого изменения скорости. Далее в результате протекания процесса осаждения вдоль пластин зафиксировано слоистое движение частиц вниз. Близкое расположения облака взвеси к границе выхода будет негативно отражаться на работе в случаях незначительного увеличения расхода стоков, что может привести к моментальному вымыванию оседающих частиц и ухудшению качества очистки. По этой причине создание в модуле дополнительного сопротивления позволяет несколько снизить положение зоны интенсивного осаждения относительно границы модуля. Однако, увеличение точек перелома пластин в модуле до двух может создать условия благоприятные для турбулизации потока и повторного взмучивания частиц [130].

#### 1.4 Проблемы эксплуатации тонкослойных модулей

Несмотря на кажущуюся конструктивную простоту, отстойник представляет собой сложную гидродинамическую систему разделения жидкой и твердой фазы, эффективность функционирования которой может существенно изменяться в процессе эксплуатации. Существенное влияние вносит изменение гидравлической нагрузки, состав загрязнений в сточных водах, а также геометрия проточной области модулей, которая может меняться в результате заиливания или механического повреждения [64, 94, 95, 169].

Негативный вклад также вносят ошибки проектирования, в результате которых в сооружениях закладываются избыточные конструктивные объемы, приводящие к формированию застойных зон. Подобная ситуация влечет за собой не только рост капитальных затрат, но и нерациональное использование земельных ресурсов. Также возможна обратная ситуация, когда очистные сооружения сталкиваются с экстремально большим расходом сточных вод, приводящим к крайне низкой эффективности очистки [133].

Отдельно следует отметить фактор ужесточения требований к качеству сбрасываемых очищенных сточных вод. Так, например, в Китайской Народной Республике до 2006 года предельно допустимая концентрация взвешенных веществ составляла 30 мг/л. С 2006 года и по настоящее время действует более строгий стандарт – 10 мг/л [91]. Многие существующие очистные сооружения были построены десятки лет назад и не используют современные технологические решения. Поэтому традиционные конструктивные схемы уже не соответствуют требованиям по эффективности и это приводит к эксплуатационным проблемам, в том числе в отстойниках с тонкослойными модулями [146, 172, 179, 181].

Рассмотрим ряд реальных случаев на канализационных очистных сооружениях в Китае. В г. Чжэнчжоу провинции Хэнань используются отстойники с тонкослойными модулями для обработки сточных вод. Во время работы модуля была зафиксирована проблема повторного взмучивания оседающих частиц вследствие

частичного заиления каналов. Сотрудники станции наблюдали значительный вынос осадка из модуля на выходе из отстойника (рисунок 1.8 а). В г. Пиндиншань (провинции Хэнань) также следует отметить проблему изменения адгезионных свойств частицы за счет наличия в воде органических соединений, что приводит к налипанию частиц на пластины модуля. Со временем этот процесс приводит к формированию значительного слоя отложений. Это не только снижает эффективность работы, но и может привести к разрушению конструкции модуля (рисунок 1.8 б) [141, 154]. Рассмотренные проблемы по данным работы [189] приводят к снижению эффективности осаждения более чем на 35% в начале выявления, с дальнейшим падением качества очистки и сбоям в работе отстойника. Применение ручного труда для очистки и обслуживания тонкослойных модулей значительно снижает эффективность работы [47].

Принимая во внимание данные работ [60] можно отметить, что по статистике в Китае из общего числа эксплуатационных проблем за период 2015 - 2020 г. ситуации на сооружениях отстаивания сточных вод составляют около от 25 до 30%.

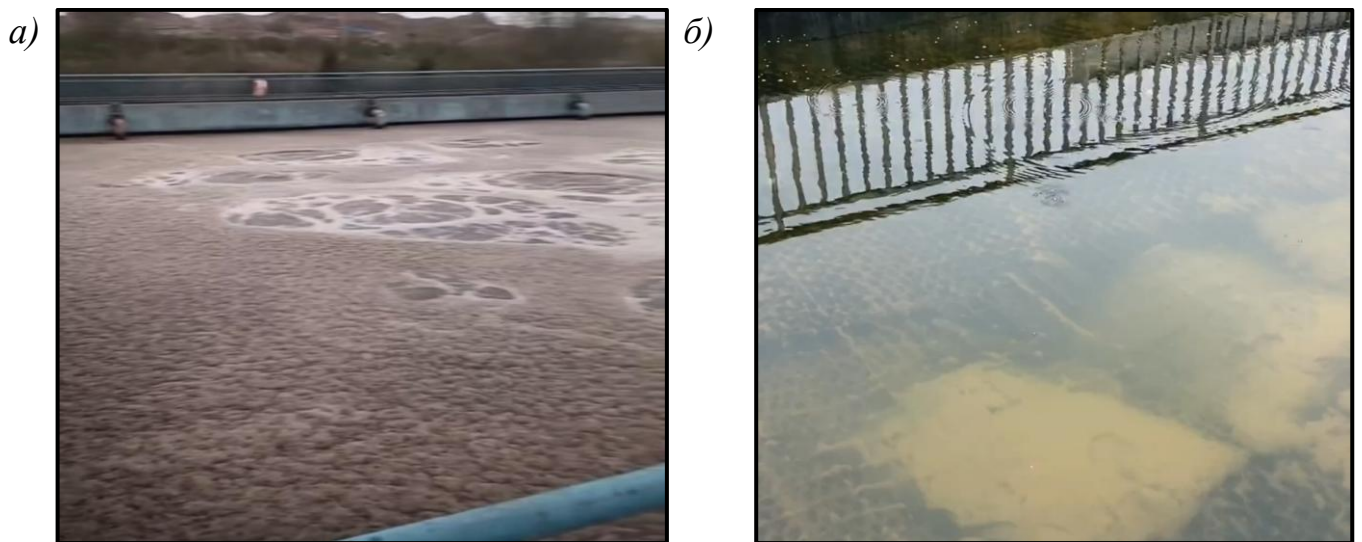


Рисунок 1.8 а) Вынос взвешенных веществ из модуля; б) Засорение тонкослойного модуля

Следует отметить, что вопрос повышения эффективности и надежности функционирования тонкослойного модуля носит значимый и приоритетный характер в технологиях очистки воды и требует проведения дополнительного исследования с целью поиска обоснованного технического решения, позволяющего повысить стабильность и высокую эффективность процесса осаждения взвеси. Данные работ [119, 128] подтверждают необходимость и актуальность в инженерном сообществе вопроса разработки новых инновационных конструкций тонкослойного модулей для обновления и модернизации существующих очистных сооружений.

## 1.5 Теория осаждения взвешенных частиц

### 1.5.1 Типы процесса осаждения

В зависимости от концентрации [89, 171], плотности и свойств осаждаемых частиц процесс можно классифицировать на четыре типа (рисунок 1.9).

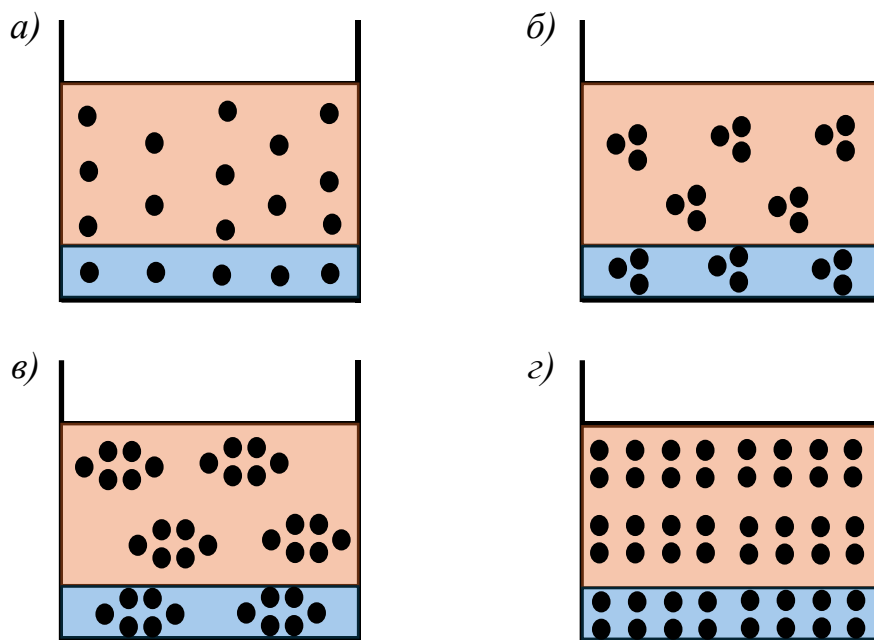


Рисунок 1.9 Типы процесса осаждения

#### а) Свободное осаждение

Свободное осаждение наблюдается при низкой концентрации взвешенных веществ, когда частицы оседают независимо друг от друга. В данном случае взаимное

влияние частиц и их взаимодействие со стенками сооружения минимально. В процессе осаждения частицы сохраняют свои индивидуальные свойства: физические характеристики (плотность, размер, форма) не изменяются, а скорость осаждения остается постоянной. Динамика процесса определяется исключительно балансом силы тяжести и сил гидродинамического сопротивления; скорость осаждения может быть рассчитана аналитически на основе геометрических параметров и плотности частиц. Свободное осаждение характерно для крупнодисперсных примесей (например, песка), которые не склонны к агломерации. Размер таких частиц более 300 мкм. На практике оптимизация процесса достигается путем регулирования гидравлической нагрузки и правильного проектирования геометрических параметров отстойника [68].

#### **б) Флокуляционное осаждение**

Флокуляционное осаждение характеризуется «склеиванием» мелких взвешенных частиц в крупные более тяжелые хлопья за счет действия реагента (флокулянта) [164]. Концентрация взвешенных частиц в сточных водах достаточно высока (обычно в пределах от 50 до 500 мг/л [80]). За счет наличия органических соединений частицы могут обладать способностью к флокуляции. В процессе движения частицы сталкиваются и объединяются в более крупные флокулы. [177]. Ключевой особенностью данного процесса является то, что размер и плотность частиц увеличиваются по мере их движения, что приводит к возрастанию скорости осаждения вдоль траектории [150], а также прилипанию к стенкам токослойного модуля.

#### **в) Зональное осаждение**

Зональное осаждение, обычно наблюдается при высокой концентрации взвешенных частиц в сточных водах (свыше 500 мг/л). В таких условиях частицы находятся настолько близко друг к другу, что силы межчастичного взаимодействия препятствуют их индивидуальному движению. В результате образуется единая пространственная структура, которая оседает как целое, формируя четкую границу раздела между осветленной жидкостью и оседающей массой осадка [186]. Скорость

осаждения в этой зоне определяется концентрацией взвеси и ограничивается вытеснением жидкости из межчастичного пространства. По мере накопления осадка в придонной зоне происходит его уплотнение под давлением вышележащих слоев [115].

### з) Компрессионное осаждение

Данный режим возникает при максимальных концентрациях взвеси, когда частицы находятся в непосредственном механическом контакте друг с другом, образуя пространственную структуру. Под давлением веса вышележащих слоев происходит сжатие этой структуры и вытеснение жидкости из межчастичного пространства. Этот процесс, называемый консолидацией, характеризуется крайне низкой скоростью. В отличие от предыдущих стадий, здесь происходит не свободное оседание частиц, а уплотнение массы осадка с течением времени [70].

Руководствуясь данными работ [6, 10, 32, 37, 44, 33] можно выделить свойства взвешенных частиц в различных сточных водах и оценить тип осаждения:

Таблица 1.3 Классификация сточных вод: состав примесей и преобладающие типы осаждения

| Тип сточных вод                                  | Характерные примеси                                                                     | Размер частиц взвеси, мкм                                               | БПК <sub>5</sub> / ХПК (ориентировочные значения) и их соотношение                    | Адгезионные свойства                                                      | Преобладающий тип осаждения         |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1                                                | 2                                                                                       | 3                                                                       | 4                                                                                     | 5                                                                         | 6                                   |
| Городские (бытовые) [10]                         | Органические остатки, фекалии, жиры, бумажные волокна, песок, бактериальное загрязнение | Широкий спектр: от коллоидов (< 0.1 мкм) до крупной взвеси (> 100 мкм). | БПК <sub>5</sub> : 150-400 мг О <sub>2</sub> /л<br>ХПК: 250-800 мг О <sub>2</sub> /л  | Средние/высокие. Органические частицы часто заряжены, склонны к слипанию. | Осаждение с флокуляцией             |
| Промышленные (нефтепереработка, нефтехимия) [32] | Нефтепродукты (эмульсии), смолы, механически                                            | Нефтяные капли: 1-100 мкм (эмульсии < 10 мкм).                          | БПК <sub>5</sub> : 100-800 мг О <sub>2</sub> /л<br>ХПК: 300-2500 мг О <sub>2</sub> /л | Низкие для гидрофобных нефтяных капель, но могут                          | Флокуляционное стесненное осаждение |

|                                                           | е примеси.                                                                                  | Твёрдые частицы: 1-500 мкм.                                                                |                                                                                           | прилипать к твёрдым частицам.                                                        |                                                                |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Промышленные (горно-обогатительные комбинаты) [4]         | Измельчённая пустая порода (глина, кварц, слюда), остатки реагентов (масла, флотореагенты). | Очень мелкие: от коллоидных глин (< 1 мкм) до частиц 50-100 мкм.                           | БПК <sub>5</sub> : 10-50 мг О <sub>2</sub> /л<br>ХПК: 50-200 мг О <sub>2</sub> /л         | Высокие для глинистых частиц. Частицы кварца менее адгезивны.                        | Стеснённое (зональное) осаждение                               |
| Промышленные (целлюлозно-бумажные комбинаты) [44]         | Древесные волокна (целлюлоза), наполнители (каолин, мел), смолы, красители.                 | Волокна (длина до 3-4 мм, толщина ~20-50 мкм). Наполнители: 1-50 мкм.                      | БПК <sub>5</sub> : 150-1000 мг О <sub>2</sub> /л<br>ХПК: 500-4000 мг О <sub>2</sub> /л    | Волокна – низкие. Наполнители – стандартные.                                         | Свободное осаждение для волокон и стеснённое для наполнителей. |
| Промышленные (металлургия, гальваника) [6]                | Металлическая пыль, окалина, гидроксиды металлов (Fe, Cu, Ni, Cr, Zn), цианиды, масла.      | Гидроксиды: от коллоидов до хлопьев 10-500 мкм. Металлическая пыль: 10-200 мкм.            | БПК <sub>5</sub> : 20-100 мг О <sub>2</sub> /л<br>ХПК: 100-500 мг О <sub>2</sub> /л       | Высокие для гидроксидов металлов.                                                    | Флокуляционное стеснённое осаждение                            |
| Аграрные/пищевые (мясокомбинаты, молочные комбинаты) [33] | Жиры, белки, кровь, частицы тканей, волокна                                                 | Белково-жировые коллоиды (< 1 мкм), хлопья белков (10-1000 мкм), жировые капли (1-50 мкм). | БПК <sub>5</sub> : 1000-5000 мг О <sub>2</sub> /л<br>ХПК: 1500-10000 мг О <sub>2</sub> /л | Высокие для белков. Жиры образуют агрегаты.                                          | Флокуляционное стеснённое осаждение + флотация                 |
| Поверхностный сток [37]                                   | Минеральные частицы, органический мусор, нефтепродукты, реагенты, тяжёлые металлы.          | Экстремально широкий: от коллоидов (< 1 мкм) до песка и мусора (>2000 мкм).                | БПК <sub>5</sub> : 20-200 мг О <sub>2</sub> /л<br>ХПК: 50-500 мг О <sub>2</sub> /л        | Неоднородные: минеральные – средние, органические – высокие, нефтепродукты – низкие. | Стесненное осаждение и флотация.                               |

Как видно, среди различных типов сточных вод, наиболее часто встречается флокуляционное стеснённое осаждение. Размер твердых частиц варьируется в общем диапазоне 0,1 - 2000 мкм.

Следует отметить, что в процессе эксплуатации тонкослойного модуля в различных местах потока могут проявляться разные типы осаждения, в зависимости от концентрации взвеси и гидравлической нагрузки.

Рассмотрим основные зоны в случае противоточной схемы функционирования тонкослойного модуля.

Таблица 1.4 Зонирование процесса осветления в тонкослойном отстойнике

| Название зоны в модуле                           | Местоположение и описание процесса                                                       | Преобладающий тип осаждения и его характеристики                                                                                                                                                        | Преобладающий вид частиц                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Зона (1) ввода и начального контакта с реагентом | Нижняя распределительная камера, сразу после ввода воды и реагентов (если используются). | Стадия образования хлопьев. Поток турбулентен, что способствует агрегации [65].                                                                                                                         | Мелкие коллоиды и коагулянт сталкиваются, начинают формировать первичные микрохлопья.                                                                                  |
| Зона (2) интенсивного стеснённого осаждения      | Нижняя (входная) треть длины пластин, где концентрация взвеси максимальна.               | Стеснённое осаждение с эффектом фильтрации. Образовавшиеся хлопья движутся вверх медленнее потока и создают движущийся плотный слой, который работает как фильтр, улавливая более мелкие частицы [164]. | Крупные и средние хлопья осаждаются (движутся вниз относительно пластин). Мелкие частицы задерживаются в слое хлопьев и агломерируются с ними (контактная коагуляция). |
| Зона (3) свободного и переходного осаждения      | Средняя часть длины пластин. Концентрация взвеси снижается.                              | Переход от стеснённого к свободному осаждению. Частицы, не задержанные в зоне (2), осаждаются здесь индивидуально или малыми группами. Происходит дозревание [178] (укрупнение) оставшихся хлопьев.     | Индивидуальное осаждение оставшихся хлопьев среднего размера. Скорость потока и концентрация уже позволяют чётко видеть траектории.                                    |
| Зона (4) окончательного осветления               | Верхняя (выходная) треть длины пластин, ближе к сборным                                  | Свободное (гравитационное) осаждение. Осветление                                                                                                                                                        | Осаждение последних мелких, но хорошо сформированных                                                                                                                   |

|                                                     |                                                                            |                                                                                                                                                                                                              |                                                                                           |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                     | желобам.                                                                   | остаточной мелкой взвеси. Самая спокойная зона с минимальной турбулентностью. Здесь оседают мельчайшие, но плотные агломераты, которые смогли достигнуть этой зоны [108].                                    | частиц. Вода на выходе из этой зоны должна быть осветлённой.                              |
| Зона (5) контактного уплотнения и скольжения осадка | Поверхность пластин по всей их длине (тонкая пристеночная плёнка).         | Транспортировка и уплотнение. Осадок, достигший пластины, уплотняется под действием силы тяжести и скользит вниз (против направления основного потока воды). Происходит выдавливание захваченной воды [167]. | Все осевшие частицы объединяются в плотный осадок и непрерывно удаляются из рабочей зоны. |
| Зона (6) сбора концентрированного осадка            | Шламовый приямок (бункер) в самой нижней точке модуля, под блоком пластин. | Концентрационное уплотнение (стеснённое осаждение в покое) [10].                                                                                                                                             | Дополнительное обезвоживание шлама, формирование плотной массы для выгрузки.              |

Руководствуясь данными таблицы, отметим, что в межпластиночном пространстве происходит стесненное, на начальном участке модуля, а затем свободное гравитационное осаждение. После осаждения формируется слой осадка, который должен постепенно сползать в сторону бункера. Однако, наличие примесей органических соединений может придавать осевшим частицам высокие адгезионные свойства, приводящие к замедленному движению осадка и постепенному зарастанию проточной области [66]. Данные работы [95] свидетельствуют о снижении степени очистки на 35% в период формирования слоя отложений более 3 - 5 мм. По данным служб эксплуатации очистных сооружений [188] частота выхода из строя тонкослойных модулей в Китае составляет более 25% в год.

В целях снижения этого процесса и повышения эффективности осаждения можно рассмотреть другую схему движения частиц, которая исключала бы накопление последних на поверхности пластин. Для реализации этого процесса, пластину, на

которую происходит осаждение частицы можно представить перфорированной. Под перфорированной пластиной устраивается канал отведения осадка, в который происходит попадание осаждающихся частиц. С целью интенсификации улавливания частиц через перфорированную пластину через канал осадка обеспечивается удаление части расхода воды, подаваемой на очистку в модуль. После отделения воды от частиц, вода снова отправляется в голову отстойника для повторной очистки.

Рассматривая такую схему, можно отметить, что в отличии от классической схемы, в данном случае на осаждающуюся частицу начинает влиять дополнительная сила.

### 1.5.2 Теория тонкослойного отстаивания

Аллен Хазен (Allen Hazen) предложил концепцию идеального отстойника [149], основанную на ряде допущений, описывающих принцип его функционирования в идеализированных условиях (рисунок 1.10). Руководствуясь положениями его теории в последующей работе, будем учитывать следующие условия идеального отстойника [72]:

1. Скорость потока в каждом вертикальном сечении отстойника имеет равномерное распределение.
2. Частицы находятся в состоянии свободного осаждения, и между ними отсутствует взаимное влияние.
3. Плотность, размер и форма частиц не изменяются в процессе осаждения, и все частицы осаждаются с одинаковой скоростью.
4. После осаждения на дно частицы считаются полностью удаленными и больше не участвуют в движении или осаждении.

Эти предпосылки легли в основу концепции идеального отстойника, которая стала важной теоретической базой для его проектирования. Особенно широко модель идеального отстойника применяется для оценки работы обычных отстойников. Отстойники с тонкослойными модулями также разрабатываются и оптимизируются на основе этой теоретической модели [78]. Такой подход позволяет прогнозировать

поведение частиц при различном распределении потока и оценивать эффективность осаждения [49].

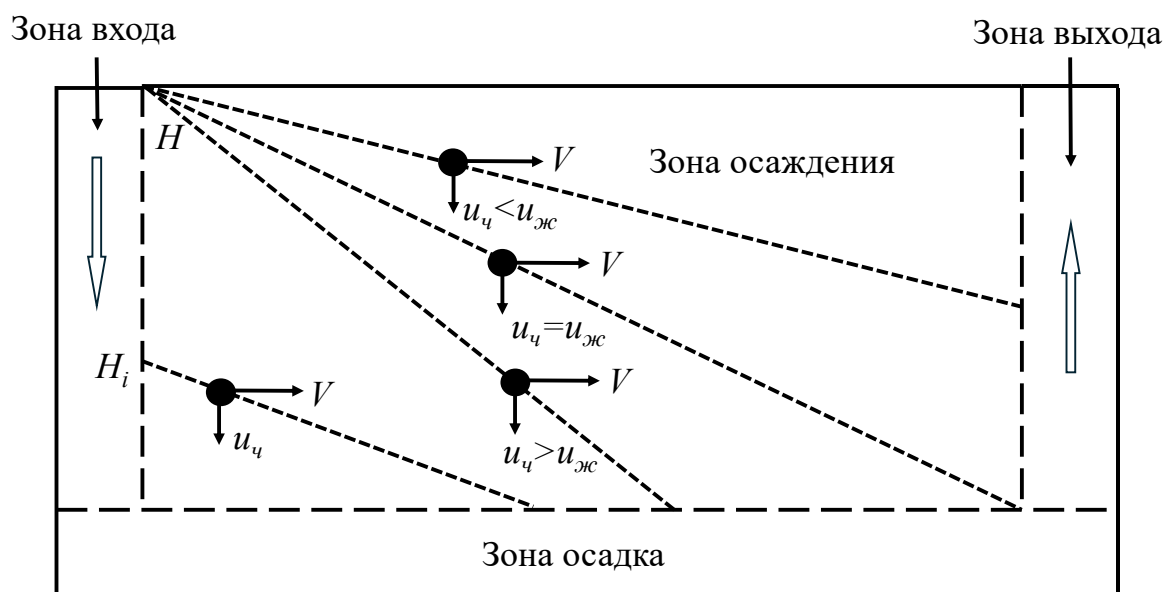


Рисунок 1.10 Схема идеального отстойника

С точки зрения проектирования идеального отстойника, критической частицей в зоне осаждения считается та, которая начинает осаждаться с вершины зоны осаждения с определенной скоростью. При неблагоприятном сочетании скорости осаждения частицы и скорости потока воды, когда последняя превалирует, возможен случай выхода частицы из отстойника. Время, которое требуется для осаждения частицы, может быть вычислено следующим образом [166]:

$$t_0 = \frac{H_o}{u_{\text{ч}}} \quad (1-3)$$

Где:  $u_{\text{ч}}$  - теоретическое значение скорости частиц (гидравлическая крупность), м/с;

$H_o$  - высота отстойника, м;

Руководствуясь данными работы [175] эффективность осаждения частиц определяется следующим образом:

$$E = \frac{u_{\text{ч}}}{Q/A} = \frac{u_{\text{ч}}}{q} \quad (1-4)$$

Где:  $Q$  - общий расход сточных вод, поступающий на очистку  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$A$  - площадь поверхности отстойника,  $\text{м}^2$ ;

$q$  - удельный расход сточных вод,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Из приведенной формулы видно, что эффективность осаждения частиц зависит от  $q$  и не связана с его высотой, длиной или временем. Руководствуясь этим положением, можно сформулировать теорию тонкослойного осаждения: при постоянной скорости осаждения частиц увеличение площади поверхности отстойника  $A$  приводит к уменьшению  $q$  и повышению эффективности осаждения  $E$ . Предположим, что один и тот же отстойник разделен по высоте на  $n$  равных частей, тогда площадь его поверхности увеличивается в  $n$  раз по сравнению с исходной [125]. Теоретически эффективность осаждения также должна увеличиться в  $n$  раз, однако в реальных условиях из-за турбулентности и геометрических особенностей отстойника достичь теоретической эффективности весьма затруднительно [59].

### 1.6 Силы, действующие на осаждающуюся частицу

В работе отстойников динамика осаждения частиц является ключевым фактором, определяющим эффективность очистки. Скорость осаждения напрямую влияет на степень удаления взвешенных веществ, при этом силовое взаимодействие между жидкой и твердой фазами выступает основным механизмом, регулирующим данный процесс. Таким образом, анализ сил, действующих на частицы, является одной из фундаментальных задач при изучении гидродинамики отстойников [71].

Рассмотрим идеализированную модель осаждения одиночной сферической частицы в неограниченном объеме неподвижной жидкости. В данной модели пренебрегаем взаимодействием частиц друг с другом и со стенками резервуара. В режиме установившегося движения (при достижении конечной скорости осаждения) силы, действующие на частицу, находятся в равновесии, а ускорение равно нулю. В этом состоянии на частицу действуют три основные силы: сила Стокса, сила

Архимеда и сила тяжести [77, 153] (рисунок 1.11).

1. Сила Стокса  $F_d$ : при движении в жидкой среде частицы испытывают вязкое сопротивление. Закон Стокса применим для описания осаждения при низких числах Рейнольдса, что соответствует ламинарному режиму [138]. В этих условиях скорость осаждения частиц прямо пропорциональна квадрату их диаметра и обратно пропорциональна динамической вязкости жидкости.

2. Сила Архимеда  $F_b$ : представляет собой направленную вертикально вверх силу, величина которой равна весу жидкости, вытесненной частицей. В отстойнике данная сила противодействует гравитации, а ее величина зависит от объема частицы и плотности жидкой среды.

3. Сила тяжести  $F_g$ : является основной движущей силой процесса осаждения, направленной вертикально вниз. Величина силы тяжести определяется произведением массы частицы на ускорение свободного падения.

Анализ комплексного влияния этих сил обеспечивает детальное понимание механики движения частиц и позволяет получить теоретическую основу для оптимизации конструкции отстойников.

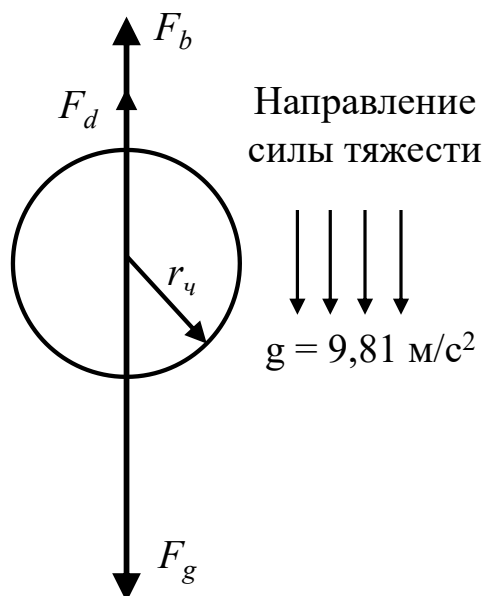


Рисунок 1.11 Силы, действующие на осаждение сферической частицы в покоящейся воде

Выражение для массы частицы имеет следующий вид:

$$m_{\text{ч}} = \frac{4}{3} \pi r_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} \quad (1-5)$$

Где:  $r_{\text{ч}}$  - радиус частиц, м;

$\rho_{\text{ч}}$  - плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>.

Далее подставляем это выражение в формулу для силы тяжести:

$$F_g = m_{\text{ч}} g = \frac{4}{3} \pi r_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} g \quad (1-6)$$

Аналогично запишем выражение для силы Архимеда:

$$F_b = \frac{4}{3} \pi r_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ж}} g \quad (1-7)$$

Где:  $\rho_{\text{ж}}$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Из-за отсутствия потока воды выражение для силы сопротивления жидкости имеет следующий вид [63]:

$$F_d = 6\pi\mu r_{\text{ч}} u_{\text{ч}} \quad (1-8)$$

Где:  $\mu$  - динамическая вязкость жидкости;

Когда частица достигает постоянной скорости осаждения, результирующая сила, действующая на нее, может быть выражена следующим образом:

$$F_g - F_b - F_d = m_{\text{ч}} \frac{du}{dt} \quad (1-9)$$

$$\frac{4}{3} \pi r_{\text{ч}}^3 g (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) - 6\pi\mu r_{\text{ч}} u_{\text{ч}} = m_{\text{ч}} \frac{du}{dt} \quad (1-10)$$

По мере увеличения времени осаждения, выражение в правой части уравнения постепенно уменьшается и стремится к нулю, в этот момент частица находится в состоянии механического равновесия. Пренебрегая этим слагаемым можно определить предельную скорость осаждения частицы:

$$u_{\text{ч}} = \frac{2r_{\text{ч}}^2 g (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})}{9\mu} \quad (1-11)$$

Из формулы видно, что конечная скорость осаждения частиц зависит только от радиуса частиц, разности плотностей, ускорения свободного падения и вязкости жидкости, и не зависит от других свойств жидкости.

Частицы в воде подвержены не только действию объемных сил (сила Архимеда и сила тяжести) [120], но и множеству других сил, включая силы сопротивления жидкости, силу Бассета<sup>1</sup>, поднимающую силу, вызванную вращением частиц (эффект Магнуса) [123], поднимающую силу, вызванную сдвигом жидкости (сила Сафмана<sup>2</sup>) [112], и сил взаимодействия между частицами [90]. При совместном действии этих сил частицы в тонкослойном модуле будут двигаться по определенной траектории [117]. Для обеспечения точности при создании математической модели движения частицы и вместе с тем упрощения сложной задачи были сделаны следующие дополнительные допущения [81]:

1. частицы считаются жесткими однородными сферами, а жидкость - несжимаемой;
2. движения частиц в тонкослойном модуле считаются независимыми друг от друга;
3. частицы не деформируются;
4. частицы не контактируют друг с другом.

Рассмотрим силы, оказывающие влияние на движение частиц в классическом тонкослойном модуле (рисунок 1.12). Согласно схеме, поток воды поступает в модуль

<sup>1</sup> Сила Бассета объясняется развитием запаздывающего пограничного слоя при изменении относительной скорости (ускорения) тел, движущихся в жидкости [118].

<sup>2</sup> Сила Сафмана обусловлена разностью давлений вдоль градиента скорости. Она возникает вследствие эффекта инерции в вязком потоке вокруг частицы и направлена перпендикулярно потоку [107].

вертикально. Модуль состоит из наклонных пластин, которые наклонены к горизонтальной плоскости под углом  $\theta$ . В данном случае рассматривается плоская задача. Начало координат плоскости  $XOY$  находится на верхней пластине. Ось  $OY$  параллельна, а  $OX$  нормальна к пластинам модуля [48].

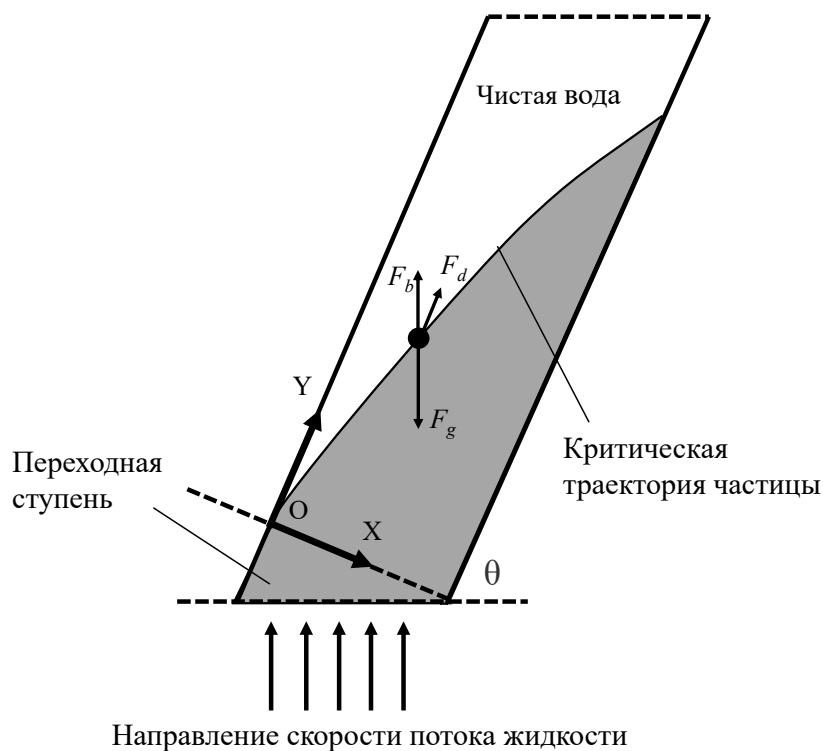


Рисунок 1.12 Схема движения взвешенной частицы в классическом тонкослойном модуле

Для моделирования осаждения частицы необходимо найти зависимость для каждой силы [48].

В тонкослойном модуле силы, действующие на частицы, в основном аналогичны силам в состоянии покоящейся воды, однако необходимо учитывать, что движение потока воды оказывает дополнительное воздействие на частицы. В несжимаемой сплошной жидкости частицы испытывают силу сопротивления. Величина зависит от размера, диаметра и характеристик частиц, а также от скорости и свойств жидкости. Выражение для силы сопротивления жидкости имеет следующий вид [155]:

$$F_d = C_D \frac{\pi r_{\text{ч}}^2}{2} \rho_{\text{ж}} (u_{\text{ч}} - u_{\text{ж}})^2 \quad (1-12)$$

Где:  $C_D$  - коэффициент сопротивления;

$u_{ж}$  - скорость движения потока жидкости, м/с.

Коэффициент сопротивления зависит от режима движения частиц в потоке и определяется числом Рейнольдса  $Re$  [28]. Коэффициент можно определить с помощью следующей зависимости:

$$C_D = \frac{24(1 + 0,17Re^{\frac{2}{3}})}{Re} \quad (1-13)$$

Когда частица достигает установившейся скорости оседания, векторная сумма сил равна нулю, и достигается состояние механического равновесия. По второму закону Ньютона уравнение движения частицы вдоль оси  $y$  имеет следующий вид:

$$F_g \sin \theta - F_b \sin \theta - F_d = m_{\text{ч}} \frac{du}{dt} \quad (1-14)$$

Подставляя (1-6), (1-7) и (1-12) в уравнение (1-14) получим:

$$\frac{4}{3} \pi r_{\text{ч}}^3 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) g \sin \theta - C_D \frac{1}{2} \rho_{\text{ж}} \pi r_{\text{ч}}^2 (u_{\text{ч}} - u_{\text{ж}})^2 = 0 \quad (1-15)$$

Когда скорость оседания частиц менее скорости потока, выражение для скорости оседания преобразуется в следующий вид:

$$u_{\text{ч}} = u_{\text{ж}} - \sqrt{\frac{8r_{\text{ч}}g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})\sin \theta}{3C_D\rho_{\text{ж}}}} \quad (1-16)$$

Когда скорость осаждения частиц превышает скорость потока, выражение скорости осаждения преобразуется в следующий вид [48]:

$$u_{\text{ч}} = u_{\text{ж}} + \sqrt{\frac{8r_{\text{ч}}g(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})\sin \theta}{3C_D\rho_{\text{ж}}}} \quad (1-17)$$

Далее следует оценить влияние различных физических параметров, на эффективность осаждения. На рисунке 1.13 представлены результаты анализа. Направление потока вдоль наклонной пластины принято за положительное [56, 118].

Плотность частиц оказывает наиболее значительное влияние среди всех параметров, и ее изменение приводит к максимальной вариации скорости осаждения,

что указывает на ключевую роль плотности как основного фактора, определяющего эффективность осаждения в новом тонкослойном модуле, тогда как влияние радиуса частиц является второстепенным.

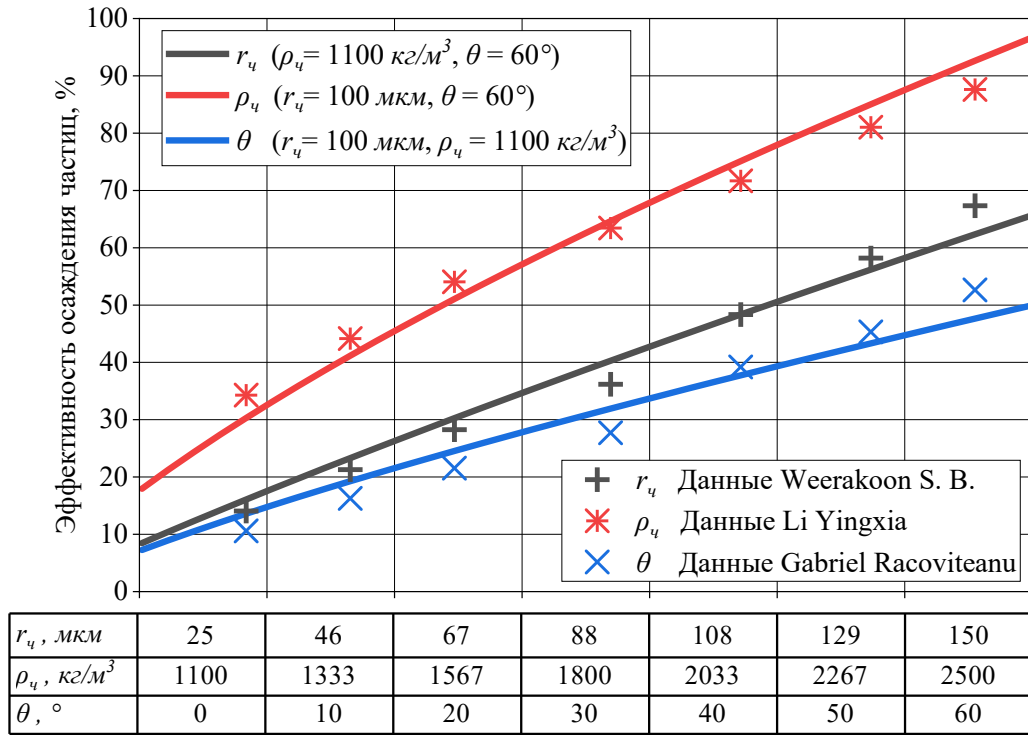


Рисунок 1.13 Зависимость между физическими параметрами и скоростью осаждения частиц:  $r_q$  - радиус частиц;  $\rho_q$  - плотность частиц;  $\theta$  - угол наклона пластин.

Выразим уравнения, позволяющие построить траекторию движения частицы:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + u_{qx}t \\ y(t) &= y_0 + u_{qy}t \end{aligned} \quad (1-18)$$

Где:  $x_0$ ,  $y_0$  – координаты начального положения частицы в модуле;  $t$  - время движения частицы, с.

Пользуясь выражением для скорости оседания частиц можно получить уравнения в окончательном виде:

$$x(t) = x_0 \pm t \left( u_{ж} \cos \theta \pm \sqrt{\frac{8r_q g (\rho_q - \rho_{ж}) \sin \theta \cos^2 \theta}{3C_D \rho_{ж}}} \right) \quad (1-19)$$

$$y(t) = y_0 \pm t \left( u_{\text{ж}} \sin \theta \pm \sqrt{\frac{8r_{\text{ч}} g (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) \sin^3 \theta}{3C_D \rho_{\text{ж}}}} \right) \quad (1-20)$$

## 1.7 Выводы

1. Осаждение взвешенных частиц в технологиях водоподготовки и очистки сточных вод занимает важное место, определяя качество протекания других процессов очистки. Применение тонкослойного модуля позволяет теоретически увеличить степень отстаивания взвеси на 20-30 %. Наиболее предпочтительной схемой организации работы тонкослойного модуля с точки зрения эффективности, является противоточная схема. По данным обзора на 2025 г. тонкослойные модули применяются на 30-40 % очистных сооружений Китая. Наиболее частая проблема эксплуатации связана с гидравлической разбалансировкой конструкции, заиливанием проточной области, что приводит к снижению эффективности очистки и разрушению пластин. В течении года на очистных сооружениях в КНР фиксируется порядка 25-30% сбоев в работе тонкослойных отстойников по указанным причинам. Осложнение работы модуля заиливанием приводит к падению эффективности на 35 %. В связи с этим направление совершенствования конструкции тонкослойного модуля для научного и инженерного сообщества является весьма актуальным для развития.

2. Рассмотрен процесс осаждения взвеси на различных участках тонкослойного модуля. Данные экспериментальных работ свидетельствуют о наличии стесненного осаждения на начальном участке пластин, а затем свободного гравитационного осаждения в межпластиночном пространстве вплоть до выхода из модуля. Обзор состава сточных различного вида, свидетельствует о присутствии органических соединений, которые приводят к изменению адгезионных свойств осадка (увеличение сил прилипания в 1,5–2 раза), что приводит к снижению пропускной способности пристеночной области пластины и локальному накапливанию взвешенных веществ. С целью совершенствования модуля предложена схема работы, предусматривающая устройство отдельного канала для отведения осадка. Использование перфорированной пластины для гидравлической связи канала осаждения частиц и

канала отвода осадка позволяет исключить накопление взвеси на поверхности пластин.

3. Рассмотрены конструкции тонкослойных модулей, используемые на практике, в том числе многослойные с изменением направления пластин. Результаты моделирования движения жестких сферических частиц показали, что локальные турбулентные возмущения в местах поворота оказывают существенное влияние на траектории частиц. Увеличение поворотов пластин позволяет обеспечить более эффективную очистку в случае увеличения расхода сточных вод по сравнению с классической конструкцией. Однако созданием дополнительных местных сопротивлений способствует появлению мест локального заиливания и нарушения режима функционирования.

4. Выполнен анализ сил, действующих на взвешенную частицу. Рассмотрена схема осаждения взвешенной сферической частицы в классическом тонкослойном модуле и получены зависимости для построения траектории осаждения частиц. Руководствуясь графиками зависимости скорости осаждения частиц от радиуса частиц, плотности частиц, угол наклона пластины и опытными данными из работ [56, 118] можно отметить соответствие расчетных и экспериментальных данных. Полученный результат говорит о возможности применения полученной зависимости в рамках дальнейшего исследования новой конструкции тонкослойного модуля.

## ГЛАВА 2 ТОНКОСЛОЙНЫЙ МОДУЛЬ С ЭФФЕКТОМ УВЛЕКАНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ

### 2.1 Конструкция тонкослойного 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 2.1 представлена схема отстойника с новым тонкослойным модулем. В данном случае классический модуль разделяется на два отдельных проточных канала: канал движения загрязненной воды и канал движения осадка. Следует отметить, что показана принципиальная схема, поэтому чтобы исключить заиливание канала движения осадка необходимо обеспечить требуемый уклон дна [47]. Канал осадка выполнен в виде замкнутого пространства и соединен в нижней части с общей трубой выгрузки осадка, на которой располагается регулирующий клапан. 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 [47]. Во время работы отстойника меняя степень открытия регулирующего клапана на трубе выгрузки осадка можно изменять скоростной режим в канале 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 [84].

Основными характеристиками модульной конструкции являются (рисунок 2.2): высота модуля ( $H$ ), ширина модуля ( $B$ ), расстояние между пластинами ( $b$ ), угол наклона пластин (принимался равным  $60^\circ$  [173]), а также площадь занимаемая отверстиями [47].

Направляемый частично поток воды через отверстия пластины создает поле скорости, позволяющее захватывать частицы, оседающие в тонкослойном модуле [47], и обеспечивать их удаление, исключая накопление на поверхности пластины.

Для сравнения режимов осаждения в лаборатории проводился эксперимент (рисунок 2.3), в рамках которого в колонке оценивалась скорость осаждения взвешенных частиц в статичном объеме воды и в случае когда из колонки обеспечивался отвод воды с расходом  $1,14 \times 10^{-3}$  л/с. В эксперименте применялись частицы с диаметром 0,0004 м. полное осаждение частиц для статичного объема воды составило 13 - 15 с, в случае с эжектированием время уменьшилось и составило 9 - 12 с. В результате эксперимента было получено увеличение скорости осаждения взвешенной частицы на 25 - 30% в случае со направленном движении потока.

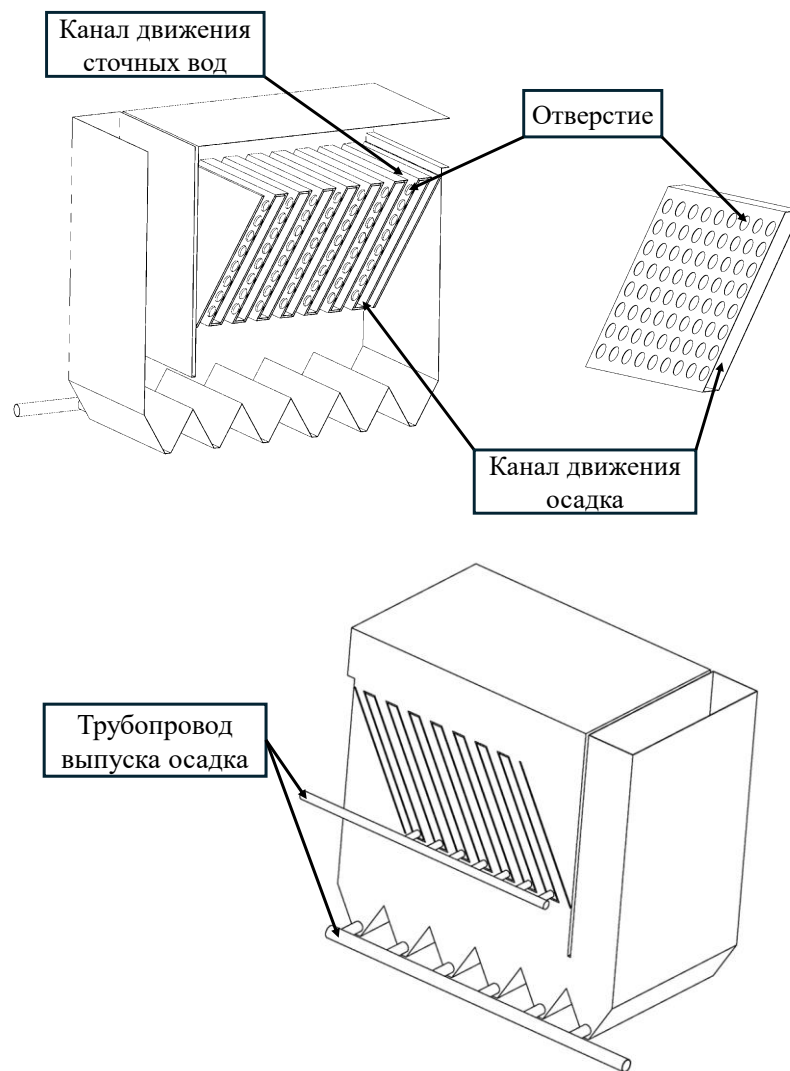


Рисунок 2.1 Схема устройства отстойника с новым тонкослойным модулем

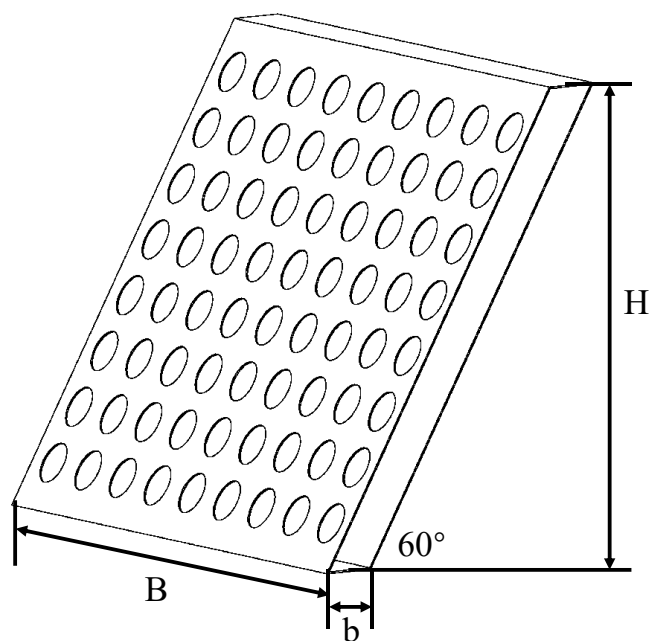


Рисунок 2.2 Схема конструкции канала движения осадка



Рисунок 2.3 Лабораторные эксперименты

Руководствуясь методологией современных исследований эффективности тонкослойных модулей [98, 103, 147] в настоящей работе было уделено внимание оценке влияния на процесс осаждения следующих факторов:

1. Изменение величины общего расхода загрязненной воды и соотношения между общим и увлекаемым потоком (для повторной очистки);
2. Изменение соотношения площади отверстий к площади наклонных пластин.

Первоначально, для оценки эффективности процесса, необходимо дополнительно определить конечную скорость осаждения частиц и их кинетические характеристики в тонкослойных модулях с учетом увлекающего частицы потока. Рассмотрим эти положения в следующем разделе.

## 2.2 Теоретические зависимости движения частиц в новых тонкослойных модулях

Рассмотрим силы, определяющие движение частицы в новом тонкослойном модуле (рисунок 2.4).

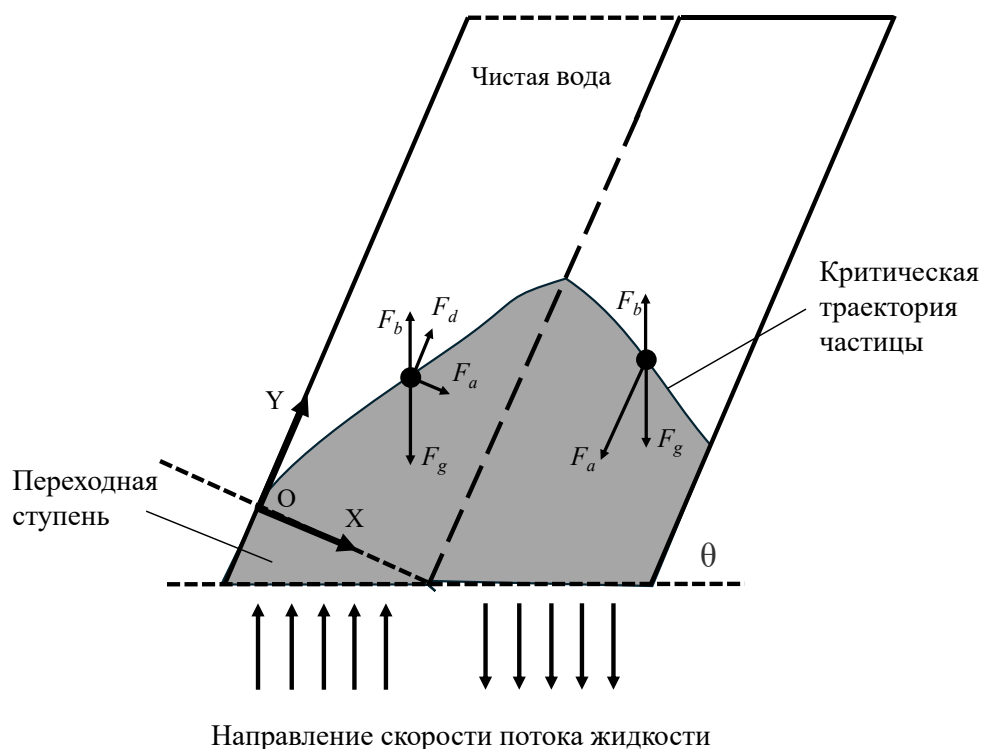


Рисунок 2.4 Силы, действующие на частицу в новом тонкослойном модуле

Рассмотрим силы в канале движения загрязненной воды. определим зависимость для каждой силы [48, 52].

Клапан на канале осадка всегда открыт, и массовый расход воды  $M$ , кг/с, можно выразить следующим соотношением:

$$M = Q_k \rho_{ж} \quad (2-1)$$

Где:  $Q_k$  - расход увлекаемого потока, м<sup>3</sup>/с;

Нисходящее ускорение в канале осадка, что решается уравнением импульса:

$$a = \frac{Q_k^2}{V_k \cdot \omega_k} \quad (2-2)$$

Где:  $Q_k$  - расход увлекаемого потока, м<sup>3</sup>/с;

$V_k$  - объем воды в канале осадка, м<sup>3</sup>;

$\omega_k$  - сечение канала, м<sup>2</sup>.

Зависимость для дополнительной силы воздействия увлекаемого потока воды на частицы имеет следующий вид:

$$F_a = \frac{4}{3} \pi r_{ч}^3 \rho_{ч} a \quad (2-3)$$

Определим силы, действующие на частицу по оси  $x$  и оси  $y$ :

для оси  $x$ :

$$F_g \cos \theta - F_b \cos \theta + F_a = F_X \quad (2-4)$$

$$\frac{4}{3} \pi r_{ч}^3 (\rho_{ч} - \rho_{ж}) g \cos \theta + \frac{4 Q_k^2 \pi r_{ч}^3 \rho_{ч}}{3 V_k \cdot \omega_k} = F_X \quad (2-5)$$

для оси  $y$ :

$$F_g \sin \theta - F_b \sin \theta - F_d = F_Y \quad (2-6)$$

$$\frac{4}{3} \pi r_{ч}^3 (\rho_{ч} - \rho_{ж}) g \sin \theta - C_D \frac{1}{2} \rho_{ж} \pi r_{ч}^2 (u_{ч} - u_{ж})^2 = F_Y \quad (2-7)$$

Формулы 2-5 и 2-7 показывают, что величина равнодействующей силы, действующей на частицу, определяет скорость ее осаждения.

$$\sqrt{(F_g - F_b)^2 + F_a^2 + F_d^2 + 2(F_g - F_b)(F_a \cos \theta - F_d \sin \theta)} = m_{\text{ч}} \frac{du}{dt} \quad (2-8)$$

Рассмотрим силы в канале осадка. Аналогично определим зависимость для каждой силы.

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

$$F_g \sin \theta - F_b \sin \theta + F_a = m_{\text{ч}} \frac{du}{dt} \quad (2-9)$$

$$\frac{4\pi r_{\text{ч}}^3}{3} \left[ g \sin \theta (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) + \frac{\rho_{\text{ч}} Q_{\text{к}}^2}{V_{\text{к}} \cdot \omega_{\text{к}}} \right] = m_{\text{ч}} \frac{du_{\text{ч}}}{dt} \quad (2-10)$$

Следовательно, получим скорость оседания частиц:

$$u_{\text{ч}} = u_{\text{жс}} - \left( g \sin \theta (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{жс}}) + \frac{\rho_{\text{ч}}^2 Q_{\text{к}}^2}{V_{\text{к}} \cdot \omega_{\text{к}}} \right) \quad (2-11)$$

Уравнения траектории движения частиц будут иметь следующий вид:

$$x(t) = x_0 + t \left( u_{\text{жс}} \cos \theta - \left( g \sin \theta \cos \theta (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{жс}}) + \frac{\rho_{\text{ч}}^2 Q_{\text{к}}^2}{V_{\text{к}} \times \omega_{\text{к}}} \right) \right) \quad (2-12)$$

$$y(t) = y_0 + t \left( u_{\text{жс}} \sin \theta - \left( g \sin \theta^2 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{жс}}) + \frac{\rho_{\text{ч}}^2 Q_{\text{к}}^2}{V_{\text{к}} \cdot \omega_{\text{к}}} \right) \right) \quad (2-13)$$

Используя зависимости (2-12) и (2-13) были получены графики траектории частицы (рисунок 2.5). На график также вынесен график траектории для классической конструкции, полученный ранее. Плотность частиц  $\rho_{\text{ч}}$  - 1100 кг/м<sup>3</sup>, диаметр частиц  $d_{\text{ч}}$  - 100 мкм, угол тонкослойного модуля  $\theta$  - 60°, скорость потока сточных вод  $u_{\text{жс}}$  - 0,01 м/с, скорость увлекаемого потока  $u_{\text{к}}$  - 0,0001 м/с [48].

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.

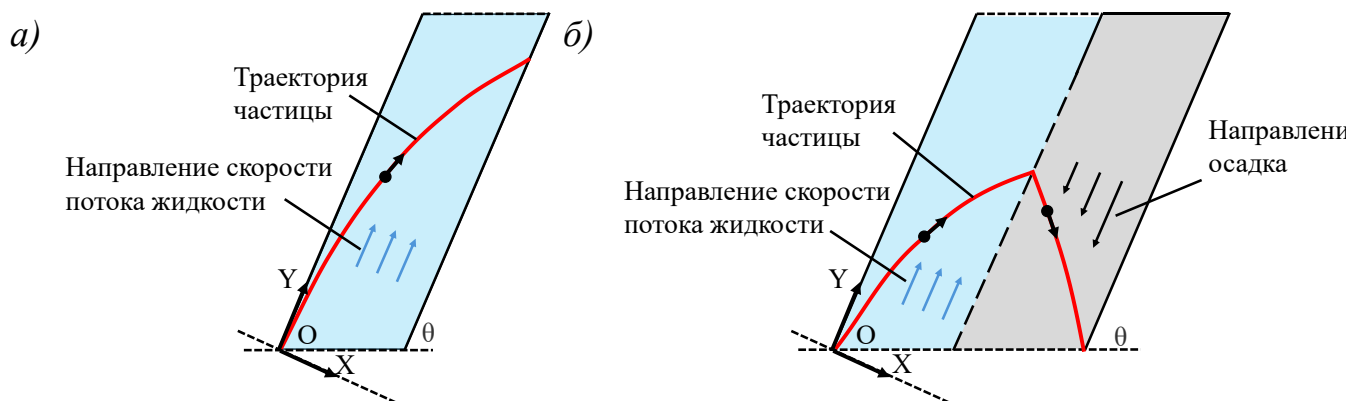


Рисунок 2.5 Траектория движения частицы

а) Классическая конструкция; б) Новая конструкция

С точки зрения теоретического анализа, на основании формулы конечной скорости осаждения частиц можно предположить, что предложенная в данном исследовании тонкослойная модульная конструкция обладает преимуществом в увеличении скорости осаждения на 30% по сравнению с классической. Однако, необходимо экспериментальное исследование, чтобы подтвердить реальную эффективность в осаждении взвешенных частиц.

## 2.3 Выводы

1. Разработана новая конструкция тонкослойного модуля. Конструкция нового модуля снабжена каналом отведения осадка, в который отводится часть расхода очищаемой воды. За счет этого исключается накопление осадка на поверхности пластины и увеличивается скорость осаждения взвешенных частиц. Основными характеристиками являются геометрические размеры модуля: высота, ширина, расстояние между пластинами, соотношение общего расхода загрязнённой воды к расходу воды, отводимой в канал осадка на повторную очистку, отношение площади

отверстий перфорированной пластины к общей площади пластины.

2. Составлены уравнения баланса сил, действующих на частицу в канале движения сточных вод и в канале осадка. В результате этого получены зависимости для расчета скорости осаждения и координат траектории взвешенной частицы. Сравнения траекторий движения частиц с классической конструкцией показало, что внутри нового тонкослойного модуля траектория движения частиц характеризуется кратчайшим расстоянием до пластины и направлена к отверстиям для улавливания и быстрого удаления в канал осадка. Величина скорости осаждения при наличии силы увлекающего потока возрастает на 30%.

## ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НОВЫХ ТОНКОСЛОЙНЫХ МОДУЛЕЙ

### 3.1 Физическое моделирование тонкослойного модуля

В лабораторном эксперименте рассматривалась работа нового тонкослойного модуля, имеющего одно межпластиночное пространство, разделенное перфорированной стенкой на канал движения воды и канал отведения осадка (рисунок 3.1). 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  $160 \times 150$  мм (ширина  $\times$  высота). В центральной пластине выполнены отверстия диаметром 5 мм. Всего 13 рядов, в каждом ряду расположено по 10 отверстий. Угол наклона пластины составлял  $60^\circ$ , Ширина канала движения загрязненной воды и канала движения осадка составляла – 35 мм [45].

Вода подается из резервуара (10) с помощью центробежного насоса (8) по трубопроводу диаметром 25 мм (2) в приемную емкость (3) из которой через отверстие направляется в основную емкость с тонкослойным модулем (4). Для регулирования расхода на напорной трубе предусмотрен шаровой кран диаметром 25 мм (6) для регулирования расхода.

Экспериментальная установка работает по оборотной схеме и имеет три функциональных зоны, аналогично конструкции локальных очистных сооружений [164]:

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 чистой воды (13), к которой подключена труба диаметром 25 мм для сброса воды в приемный резервуар.

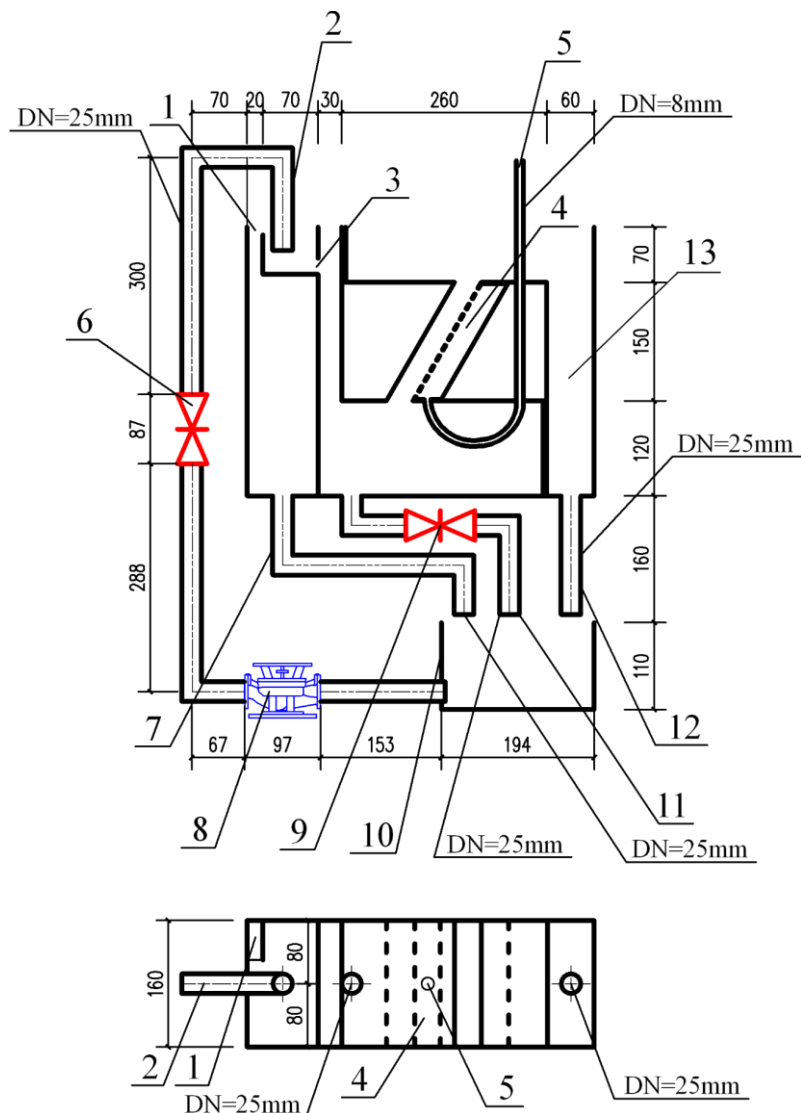


Рисунок 3.1 Схема экспериментальной установки

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

Вся установка закреплена на несущей раме (рисунок 3.2). Параметры установки представлены в Приложении А.

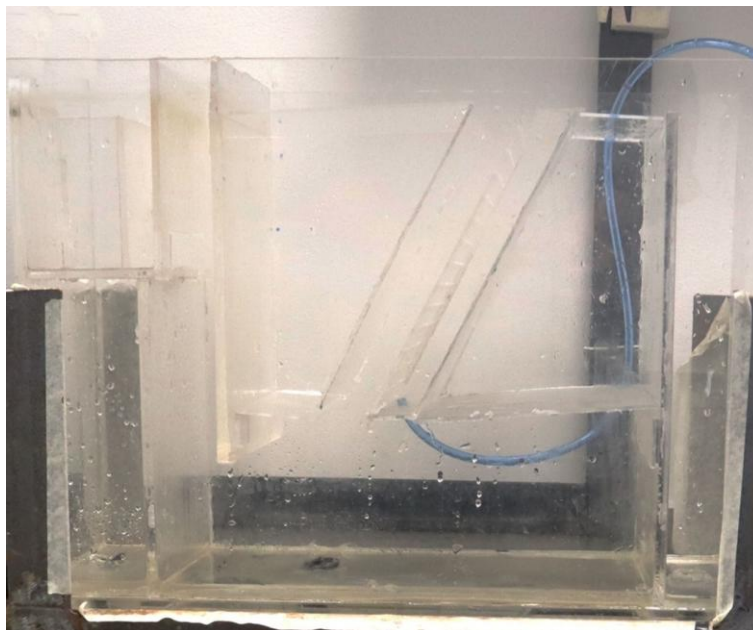


Рисунок 3.2 Фотография лабораторной установки

В качестве жидкости выступает вода. Температура составляет  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а динамическая вязкость -  $1,002 \cdot 10^{-3}\text{ Па}\cdot\text{с}$ . В качестве взвешенных частиц использовался натуральный кварцевый песок по стандарту *ГОСТ 22551-77*: плотность  $\rho = 2650\text{ кг/м}^3$ . (рисунок 3.3). Через сито отбирались кварцевые песчинки диаметром  $0,0001\text{ м}$ ,  $0,0002\text{ м}$ ,  $0,0003\text{ м}$  и  $0,0004\text{ м}$ .

Перед экспериментом установка заполнялась водой и достигалось установившееся движение потока. В зоне движения потока к тонкослойному модулю скорость потока воды поддерживалась больше скорости седиментации частиц, что позволило предотвратить преждевременное оседание частиц на дно емкости и обеспечить их нахождение во взвешенном состоянии [45].

На выходном трубопроводе устанавливалась решетка с фильтровальной бумагой, на которой задерживались частицы. После высушивания задержанный осадок взвешивался с помощью электронных микровесов ВЛТЭ-500 «Госметр».



Рисунок 3.3. Натуральный кварцевый песок

Лабораторное моделирование отстойников с тонкослойными модулями широко используется для изучения их гидравлического режима [185]. Однако между гидравлическим режимом лабораторной модели и натурным сооружением нередко наблюдаются существенные расхождения, обусловленные особенностями протекания физического процесса в малых масштабах. Поскольку в данном процессе ключевым фактором является режим протекания потока, то в качестве основного критерия гидродинамического подобия будет выступать критерий Рейнольдса (Re):

$$Re = \frac{u_{ж} L_{Re}}{\mu} \quad (3-1)$$

Где:

$u_{ж}$  - скорость движения потока жидкости, м/с;

$L_{Re}$  - характерная длина (расстояние между пластинами), м;

$\mu$  - динамическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;

Для модельного и натурального тонкослойного модуля будет выполняться условие:

$$Re_H = Re_M \quad (3-2)$$

$$u_{жH} L_{ReH} = u_{жM} L_{ReM} \quad (3-3)$$

Из выражения (3-3) можно выразить значение величины скорости потока в лабораторной установке:

$$u_{жМ} = \frac{u_{жН} L_{ReH}}{L_{ReM}} \quad (3-4)$$

Руководствуясь данными работ [40, 108, 124] о характеристиках тонкослойных модулей, применяемых в локальных очистных сооружениях, устанавливались параметры физической модели. Следует отметить, что реальное сооружение пересчитывается на одиночное межпластиночное пространство. В таблице 3.1 указаны диапазоны характеристик для реального сооружения и соответствующие им параметры модели.

Таблица 3.1 Размеры лабораторной модели тонкослойного модуля

| Параметр                                                             | Реальное сооружение | Лабораторная модель |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Расход воды, л/с                                                     | 0,60 – 1,20         | 0,06 – 0,11         |
| Скорость потока в модуле, м/с                                        | 0,01 – 0,02         | 0,02 – 0,03         |
| Расстояние между пластинами, м                                       | 0,06                | 0,02                |
| Ширина пластины, м                                                   | 1                   | 0,16                |
| Длина пластины, м                                                    | 1,2                 | 0,21                |
| Площадь живого сечения межпластиночного пространства, м <sup>2</sup> | 0,06                | 0,0032              |

Запуск взвешенных частиц осуществлялся в приемную емкость (3) после наступления установившегося движения в оборотной системе установки. Исходная концентрация частиц задавалась гравиметрическим методом: 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.

На установке было проведено две серии опытов.

#### 1) Первая серия опытов

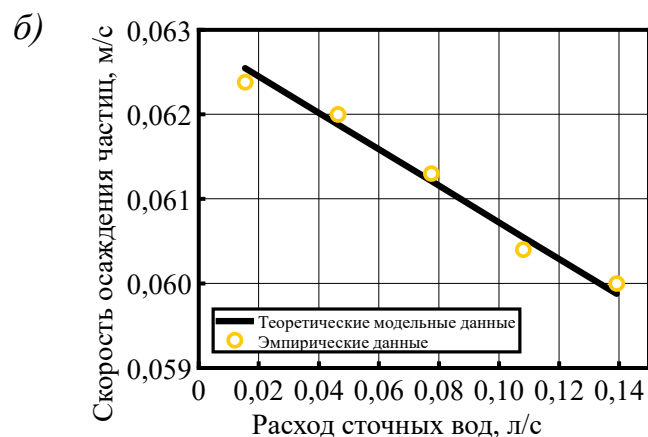
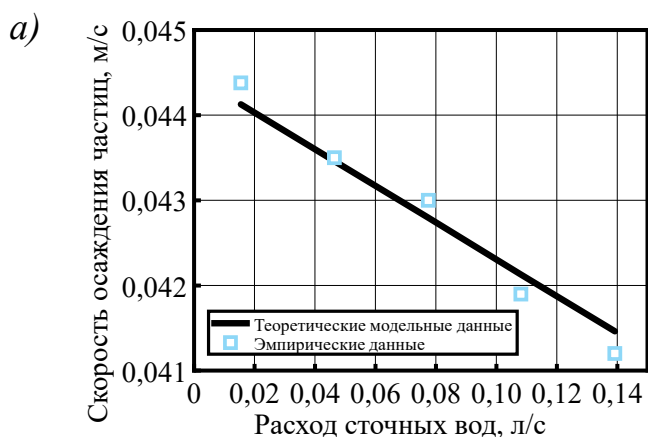
В ходе наблюдения осуществлялась фиксация траектории и скорости движения

осаждающихся частиц с момента попадания их в канал движения осадка до осаждения на дно [116]. С помощью линейки измерялась длина зоны оседания, а также подсчитывалось время осаждения, после чего определялась конечная скорость оседания частиц [47]. Эксперимент выполнялся для каждой фракции частиц отдельно (таблица 3.2). Для исключения ошибок измерение каждой характеристики осуществлялось пять раз и конечный результат усреднялся.

Таблица 3.2 Условия проведения опыта

| № серии опытов | Диаметр частиц, $d_u$ , м | Расход воды на входе, $Q$ , л/с | Расход сифонной трубы, $Q_k$ , 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 3.4). Черной линией отражены теоретические результаты, полученные с помощью уравнения (2-11). Следует отметить хорошую сходимость экспериментальных и теоретических данных. По мере увеличения размера частиц конечная скорость осаждения увеличивается, что соответствует ожиданиям. Увеличение расхода очищаемой воды приводит к уменьшению скорости осаждения.



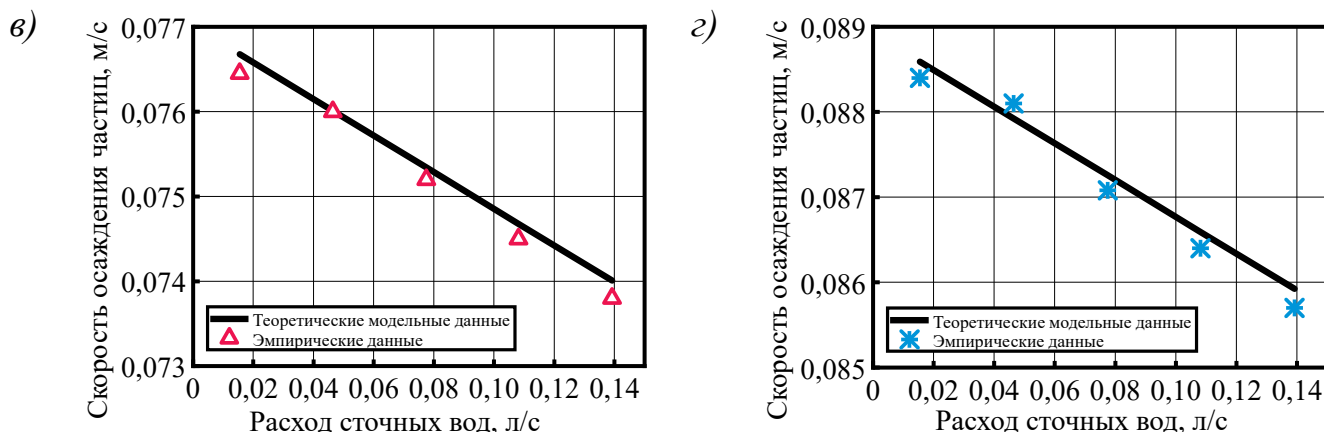


Рисунок 3.4 Зависимость конечной скорости оседания частиц в зависимости от расхода воды и фракции частиц:

а) Опыт 1; б) Опыт 2; в) Опыт 3; г) Опыт 4

Поскольку интервал вариации между экспериментальными и модельными данными невелик, для более точной оценки корреляции данных осуществлялось вычисление относительного отклонения конечной скорости оседания частиц. На рисунке 3.5 показана зависимость отклонения между экспериментальными и модельными данными в зависимости от расхода, где сплошная линия указывает на полное совпадение данных [48].

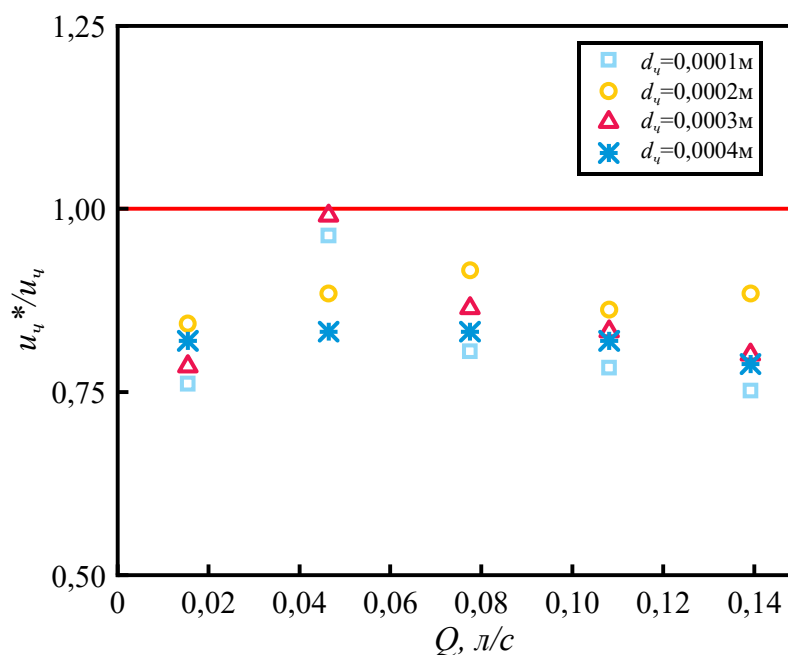


Рисунок 3.5 Изменение относительного отклонения  $u_{\text{ч}}^*/u_{\text{ч}}$

Во всех случаях относительное отклонение между модельными и экспериментальными данными попало в пределы от 0,75 до 1, что говорит о достоверности предложенной модели [116]. Экспериментальные результаты показывают, что разработанная теоретическая модель может достаточно близко предсказывать фактическую скорость осаждения взвешенных частиц. Погрешность результатов составляет от 1,22% до 1,87% [48].

## 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 данного этапа 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 механизма. Оценка количества осевших частиц осуществлялась путем сравнения исходной массы инъецированных частиц и массы частиц, которые покинули тонкослойный модуль не осев. В таблице 3.3 показаны условия проведения опытов.

Таблица 3.3 Условия проведения опыта

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

На рисунке 3.6 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 3.7).

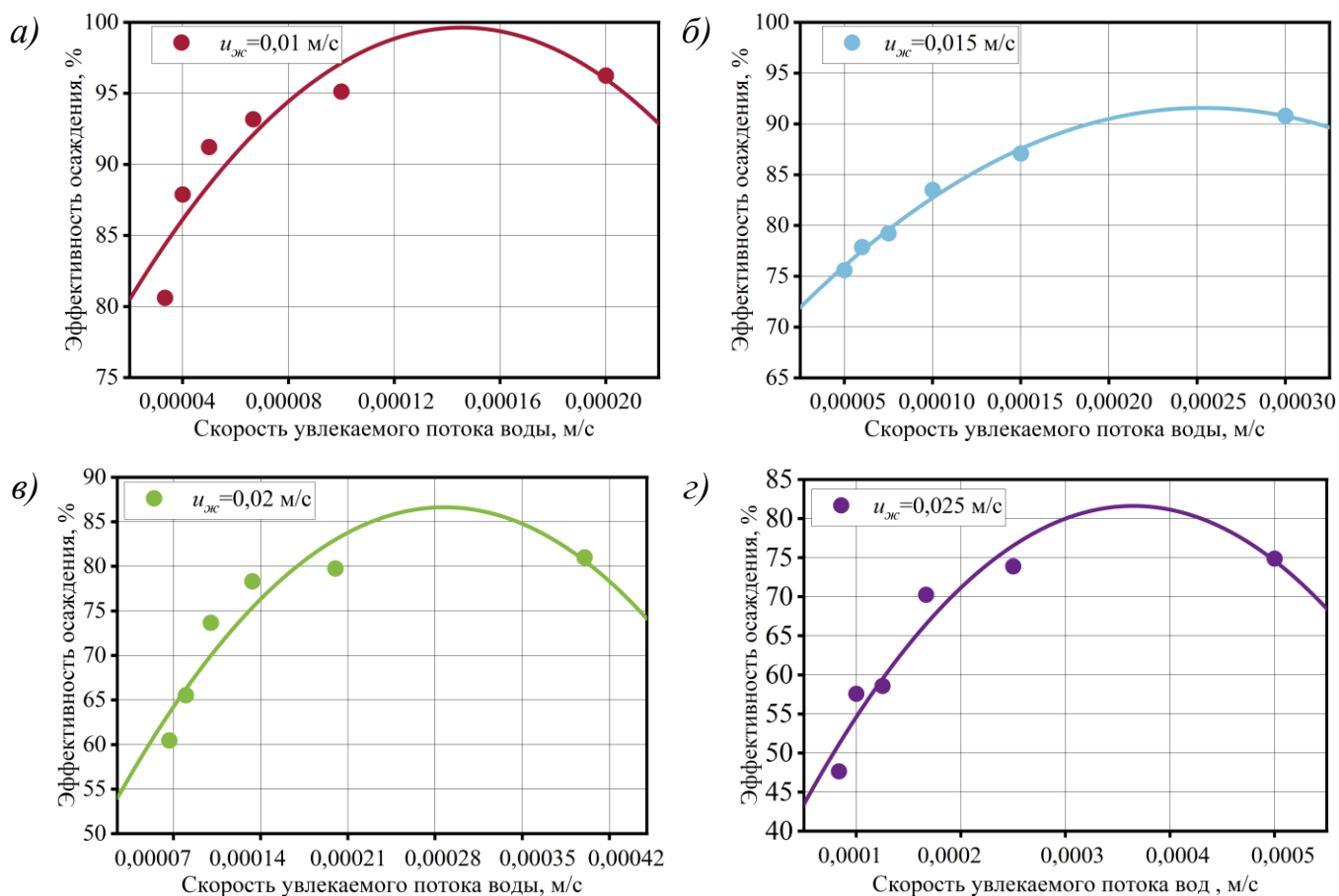


Рисунок 3.6 Зависимость эффективности осаждения взвеси от скорости увлекаемого потока воды

а)  $u_{жс} = 0,01$  м/с, б)  $u_{жс} = 0,015$  м/с, в)  $u_{жс} = 0,02$  м/с, г)  $u_{жс} = 0,025$  м/с

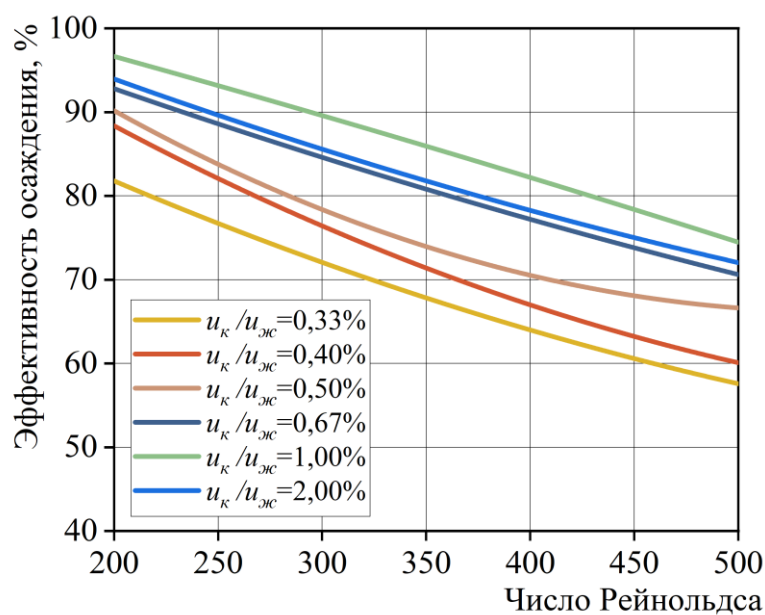


Рисунок 3.7 Зависимость между эффективностью осаждения и числом Рейнольдса

Выберем точки данных с эффективностью осаждения более 80%. На основе этих результатов можно определить оптимальную скорость потока воды в тонкослойном модуле, а также установить оптимальное соотношение скоростей потока воды в канале движения сточных вод и в канале движения осадка (рисунок 3.8).

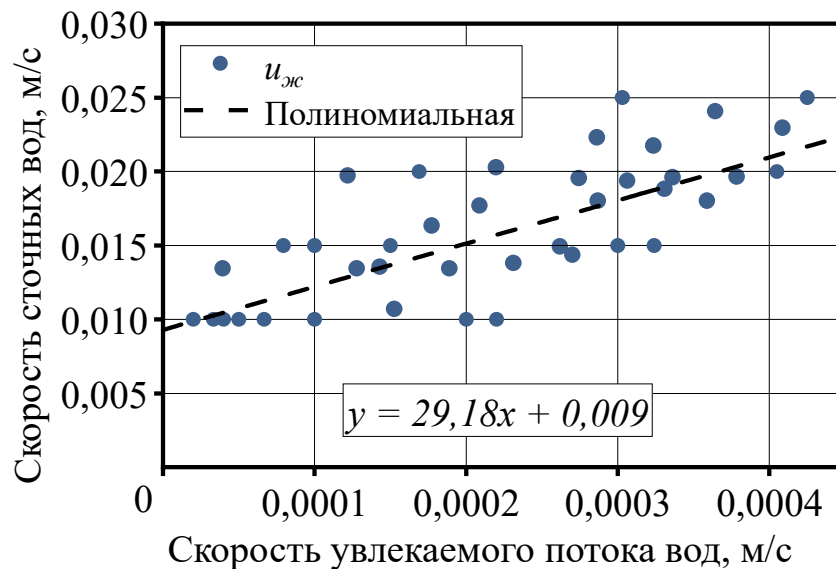


Рисунок 3.8 Взаимосвязь между скоростью потока сточных вод  $u_{жс}$  и скоростью увлекаемого потока воды  $u_k$  при эффективности очистки более 80%

На основе физических экспериментов можно сделать следующие выводы:

А) 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%:

$$u_{жс} = 29,18 u_k + 0,009 \quad (3-5)$$

Полученная зависимость может быть использована в инженерной практике для расчета характеристик тонкослойного модуля.

Б) 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 характеристик.

### 3.2 Численное моделирование тонкослойных модулей

В современной инженерной практике использование CFD-моделирования существенно ускоряет разработку и внедрение новых конструкций очистных сооружений [156]. Применение численного моделирования позволяет выполнить оценку рациональности конструктивных решений с точки зрения получения максимального эффекта очистки [4, 148]. Руководствуясь результатами работы [102] создавалась модель нового тонкослойного модуля в программе ANSYS FLUENT.

Для моделирования двухфазного потока в тонкослойном модуле использовался метод Эйлера-Эйлера. Этот метод сочетает в себе эффективность вычисления и достаточную точность результатов [54]. Движение вязкой несжимаемой жидкости описывается уравнением неразрывности и уравнениями Навье–Стокса [165]. Уравнения неразрывности и движения жидкости в условиях плоской задачи в декартовой системе координат имеют следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial X}(U^2) + \frac{\partial}{\partial Y}(V^2) = 0 \quad (3-6)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial X} \left( \mu_{eff} \frac{\partial U}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \mu_{eff} \frac{\partial U}{\partial Y} \right) \quad (3-7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\partial}{\partial X} \left( \mu_{eff} \frac{\partial V}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \mu_{eff} \frac{\partial V}{\partial Y} \right) + g \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} \quad (3-8)$$

Где:  $U$  и  $V$  - обозначают средние компоненты скорости в направлениях  $X$  и  $Y$  соответственно;

$P$  - статическое давление, Па;

$\rho_{\text{ж}}$  - плотность жидкости;

$\rho_{\text{ч}}$  - плотность частиц;

$\mu_{eff}$  - коэффициент динамической вязкости.

Для процесса осаждения частиц обычно используется  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности [129]. Модель  $k$ - $\varepsilon$  определяет зависимость турбулентной вязкости  $\mu_t$  от турбулентной кинетической энергии  $k$  и скорости диссипации энергии  $\varepsilon$ , что выражается следующим уравнением:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3-9)$$

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-10)$$

Распределение характеристик  $k$  и  $\varepsilon$  определяется решением уравнением переноса для каждой из них:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial X} + V \frac{\partial k}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial Y} \right) + P_k + P_b - \varepsilon \quad (3-11)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U \frac{\partial \varepsilon}{\partial X} + V \frac{\partial \varepsilon}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial Y} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3-12)$$

При решении уравнений принимались стандартные эмпирические константы [69]:  $C_\mu=0,09$ ,  $C_{\varepsilon 1}=1,44$ ,  $C_{\varepsilon 2}=1,92$ ,  $\sigma_k=1,0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1,3$ .

Построение модели включало следующие этапы:

### 1) Создание геометрии

На начальном этапе создается геометрия расчетной области, в которой предполагается взаимное движение жидкости (воды) и частиц, а сама область ограничена твердыми стенками конструкции. Стенки расчетной области определяют границы моделирования, влияя на траекторию движения потока жидкости с частицами и последующий процесс осаждения частиц. Для оптимизации расчета максимально выполнялось упрощение модели и рассматривалось течение потока только в одном межпластиночном пространстве модуля [47].

### 2) Построение сетки

Далее для генерации сетки в расчетной области использовался инструмент построения сетки (*Mechanical*). Как правило, чем выше точность сетки (количество

ячеек сетки на единицу площади), чем мельче сетка, тем выше точность результатов моделирования [107]. В данном исследовании, учитывая процесс течения в межпластиночном пространстве потока с частицами размером от 50 до 300 мкм [47], была выбрана структурированная четырехугольная сетка с размером ячейки  $0,002\text{ м}$ , что позволило получить результаты требуемой точности и обеспечить сходимость задачи.

Следует отметить, что для обеспечения правильного моделирования пограничного слоя в зоне контакта потока с твердой стенкой модуля осуществлялось дополнительное умельчение сетки. Чтобы обеспечить правильное моделирование течения в пограничном слое, необходимо использовать достаточно плотную сетку с размером ячейки у твердой стенки  $0,0004\text{ м}$ . Количество построенных ячеек сетки составляет 30 000. На рисунке 3.9 показана сгенерированная в расчетной области сетка [47].

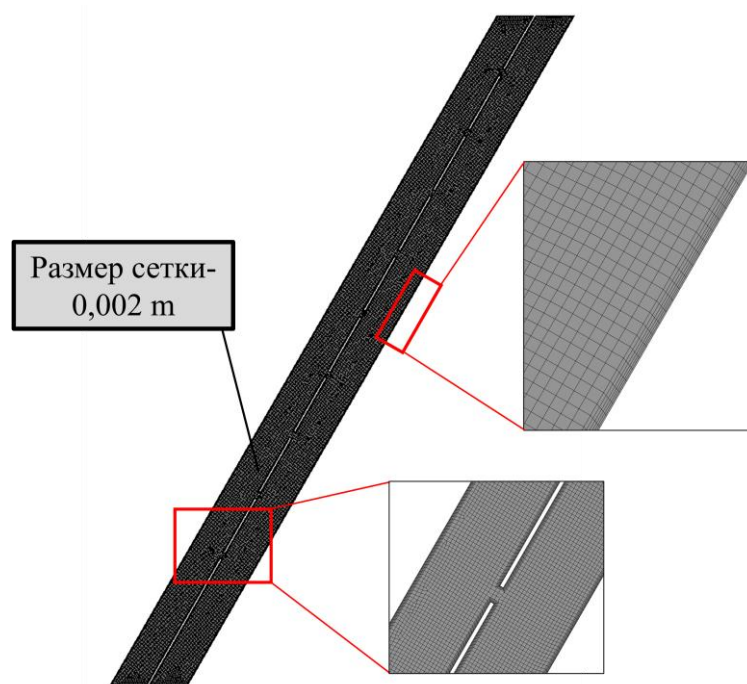


Рисунок 3.9 Расчетная сетка

### 3) Создание граничных условий

Далее осуществляется установка граничных условий, при этом необходимо обеспечить реалистичные условия моделирования. Стенки отстойника обычно

моделируются с использованием условия прилипания (no-slip condition), предполагающего нулевую скорость жидкости на стенке, и применением стандартных пристеночных функций [47].

Следует отметить, что при использовании модели дискретной фазы (*DPM*) необходимо задать специальные граничные условия [159]. На входе и выходе установлены условия выхода (*escape*) для частиц, позволяющие им свободно покидать область расчета. Для всех остальных поверхностей модели установлены условия отражение (*reflect*), что позволяет максимально реалистично моделировать движение частиц в тонкослойном модуле [45], с учетом процесса сползания частицы по пластине и возможного повторного взмучивания.

#### 4) Настройки моделей

После установки сетки и граничных условий следующим шагом является выбор подходящей физической модели для описания поведения потока и частиц. Для точной оценки поведения частиц в потоке жидкости и эффекта осаждения учитывается влияние силы тяжести с помощью установки ускорения свободного падения вдоль оси Y, равного  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ . В качестве жидкости в модели используется вода с плотностью  $998.2 \text{ кг/м}^3$ . Взаимодействие между потоком воды и частицами имеет решающее значение, поэтому для моделирования состояния движения и траектории частиц в потоке воды используется модель дискретной фазы (*DPM, Discrete Phase Model*) [162]. *DPM* — это эффективный метод для решения задач многофазных потоков газ-твердое тело, жидкость-твердое тело, который анализирует динамическое поведение частиц путем отслеживания их траекторий в потоке жидкости. Предполагается, что частицы имеют форму гладких сфер. Плотность частиц составляет  $1100 \text{ кг/м}^3$  [192]. Сопротивление между потоком воды и частицами рассчитывается методом Шиллера-Ноймана [57].

#### 5) Настройки решателя

Процесс осаждения частиц рассматривается в рамках нестационарной задачи с учетом характеристик динамического взаимодействия между жидкостью и частицами. Для решения используется метод *SIMPLE* [174]. Общее время расчета

составляет  $T = 1000$  секунд, причем процесс расчета разделен на два основных этапа: стационарное решение потока воды и выпуска частиц, с последующим отслеживанием их траекторий [47].

В течение первых 50 секунд модель учитывает только водный поток для достижения установившегося состояния течения. Сходимость определяется в момент достижения невязок всех переменных менее  $10^{-6}$ , что обеспечивает точность и устойчивость решения, при этом контроль сходимости осуществляется на основе вычисленных скоростей потока на каждой итерации. Следует также отметить, что сходимость расчета также проверялась по количеству частиц, вычисляемому на каждой итерации. Расчет считался сходящимся, когда процент частиц, покидающих модель, переставал изменяться. После стабилизации водного потока частицы с заданной плотностью и диаметром выпускаются через входной канал в интервале от 50 до 100 секунд и перемещаются вместе с потоком, при этом в реальном времени отслеживаются траектории движения, скорость, положение и взаимодействия частиц в потоке [47]. Для обеспечения точности вычислений задавался шаг по времени равный  $t = 0,1$  с.

#### 6) Визуализация результатов расчета

После выполнения расчетов проводилась постобработка результатов с использованием инструмента CFD-post, где можно получить визуализацию взаимного движения частиц и воды в расчетной области, а также векторы скорости, концентрацию частиц и их траектории в расчетной области.

### 3.2.1 Проверка конечно-элементной модели тонкослойного модуля

Достоверность результатов, полученных с помощью математической модели, может быть подтверждена только путем сравнения с экспериментальными данными, полученными на физической модели. С этой целью в ANSYS FLUENT была создана тонкостенная модульная конструкция, идентичная, ранее рассмотренной, лабораторной модели. На математической и физической моделях была разработана и проведена серия одинаковых экспериментов [47]. Настройки модели в ANSYS

FLUENT повторяли условия эксперимента, которые использовались на физической модели. Далее для верификации результатов вычислительного эксперимента использовались данные эксперимента. На рисунке 3.10 показано качественное сравнение потоков очищаемой воды в тонкослойном модуле.

На фотографии эксперимента видны зоны скопления взвешенных частиц вблизи отверстий пластины с последующим попаданием в канал отведения осадка. Результат расчета отображает область с высокой концентрацией взвеси, которая присутствует ближе к верхней пластине модуля. По направлению к перфорированной пластине концентрация снижается за счет осаждения и уноса в канал осадка.

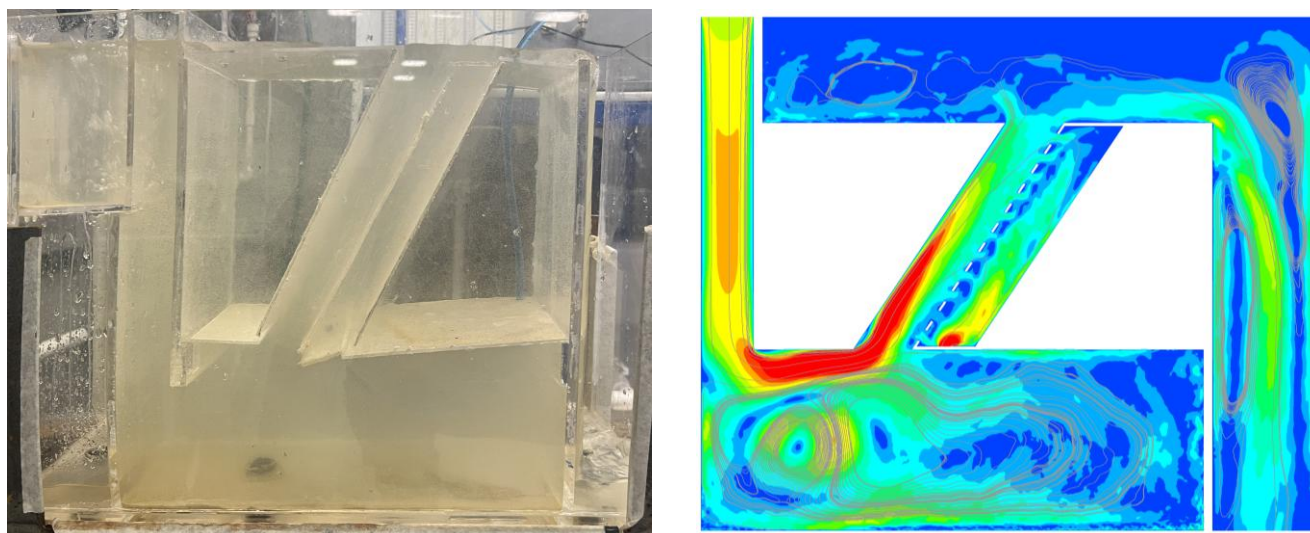


Рисунок 3.10 Сравнение процесса осаждения в физическом и вычислительном эксперименте

Результаты сравнения результатов математического моделирования и лабораторного эксперимента представлено на рисунке 3.11. 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, что не только подтверждает эффективность численного метода при решении сложных задач гидродинамики, но и предоставляет

надежный инструмент для последующих исследований на масштабных моделях, который может быть использован в качестве оценки эффективности осаждения [45].

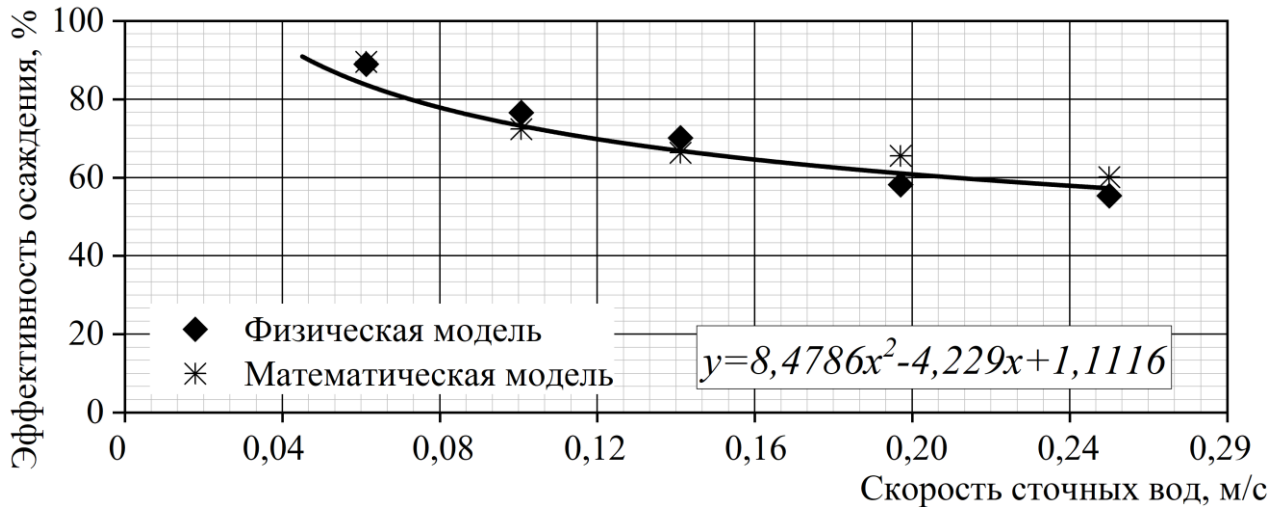


Рисунок 3.11 Зависимость эффективности осаждения взвешенных частиц от скорости сточных вод

### 3.2.2 Результаты математического моделирования

В предлагаемой конструкции тонкослойного модуля кроме скорости движения сточных вод на эффективность осаждения частиц оказывает влияние скорость движения потока в канале осадка. Поэтому основными задачами являются определение их оптимального соотношения, а также установление необходимой площади отверстий на пластине.

Определение оптимального соотношения между скоростями позволит поддерживать высокую эффективность осаждения частиц в условиях меняющегося расхода поступающих сточных вод.

В данном исследовании высота тонкослойного модуля составляла  $H = 1$  м, расстояние между пластинами  $b = 0,05$  м, диаметр малых отверстий в канале осадка  $d_o = 0,02$  м, а угол наклона пластин был  $60^\circ$  [173].

Общее количество вводимых частиц составляет  $N = 30\,000$ . По диаметру частицы равномерно распределялись на 10 групп. В каждой группе фиксированно присутствовало по 3 000 частиц со следующими диапазонами диаметров: 50–75 мкм, 75–100 мкм, 100–125 мкм, 125–150 мкм, 150–175 мкм, 175–200 мкм, 200–225 мкм, 225–250 мкм, 250–275 мкм, 275–300 мкм. Количество задержанных в модуле частиц

фиксировалось, как разница между общим количеством частиц, поданных через условие *Velocity inlet* и количеством частиц, покинувших расчетную область через условие *Pressure outlet* (рисунок 3.12) [47].

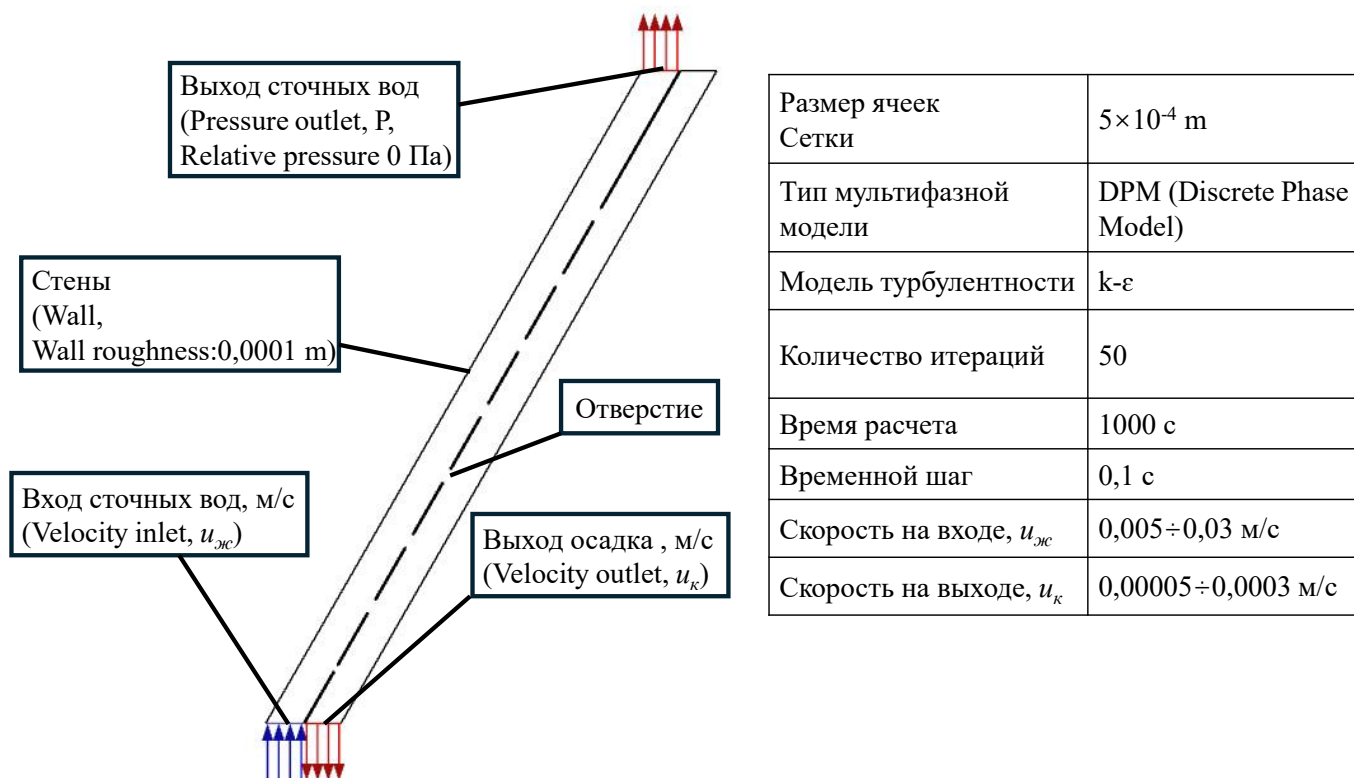


Рисунок 3.12 Математическая модель нового тонкослойного модуля, граничные условия и параметры моделирования

Посредством вывода результатов в *CFD-post* была получена информация о распределении концентрации частиц внутри тонкослойного модуля. Это позволяет оценить эффективность работы нового тонкослойного модуля. Результаты были сопоставлены с классическим тонкослойным модулем, который в настоящее время широко используется. Подобное исследование имеет практическую значимость и позволяет напрямую определить эксплуатационные характеристики новой конструкции модуля, предложенной в данном исследовании.

На рисунке 3.13 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 3.13 а, б) осадок сосредоточен в нижней части модуля; значительная его доля попадает в канал для осадка [49]. В последующие моменты времени (рисунок 3.13 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.

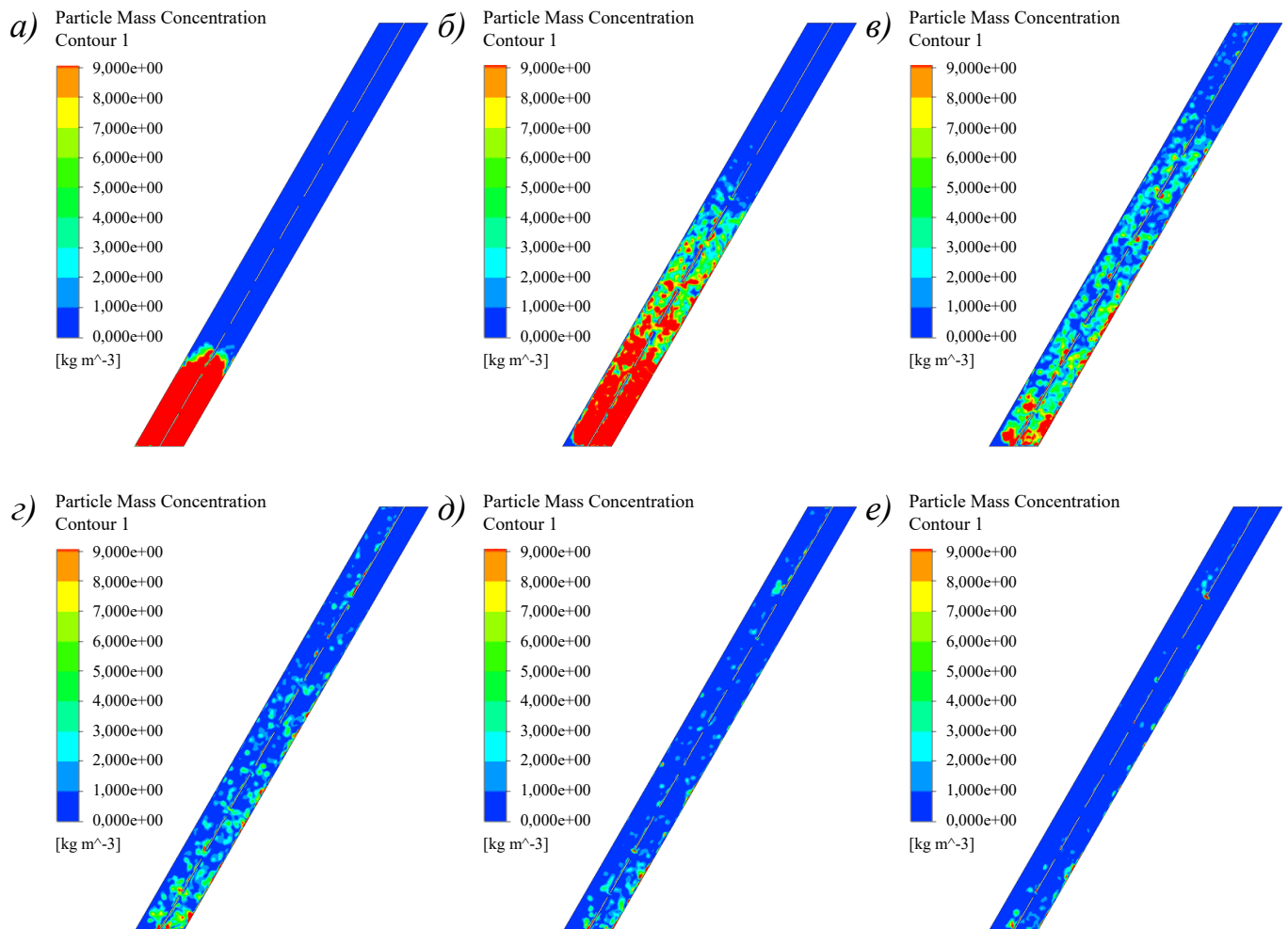


Рисунок 3.13 Концентрация частиц в новом тонкослойном модуле при скорости  $u_{жс} = 0,005$  м/с в момент времени:

а)  $t=120$  с, б)  $t=280$  с, в)  $t=440$  с, г)  $t=600$  с, д)  $t=760$  с, е)  $t=920$  с.

Для сравнения, на рисунке 3.14 приведены результаты распределения частиц внутри классического тонкослойного модуля в различные моменты времени при той же скорости потока на входе  $u_{жс} = 0,005$  м/с. Как видно из рисунка 3.14 б и в, на

начальной стадии осаждения классический тонкослойный модуль менее эффективен, и некоторая часть частиц сразу выносится с потоком воды (15 786 шт.) [49]. С увеличением времени отстаивания концентрация осадка также снижалась (рисунок 3.14 *г*, *д* и *е*), однако сравнивая итоговый результат можно отметить, что в новом тонкослойном модуле было задержано на 10 564 частицы больше, чем в классическом.

Результаты численного моделирования подтверждают значимость и научную обоснованность предлагаемого модуля для улучшения седиментации взвешенных частиц.

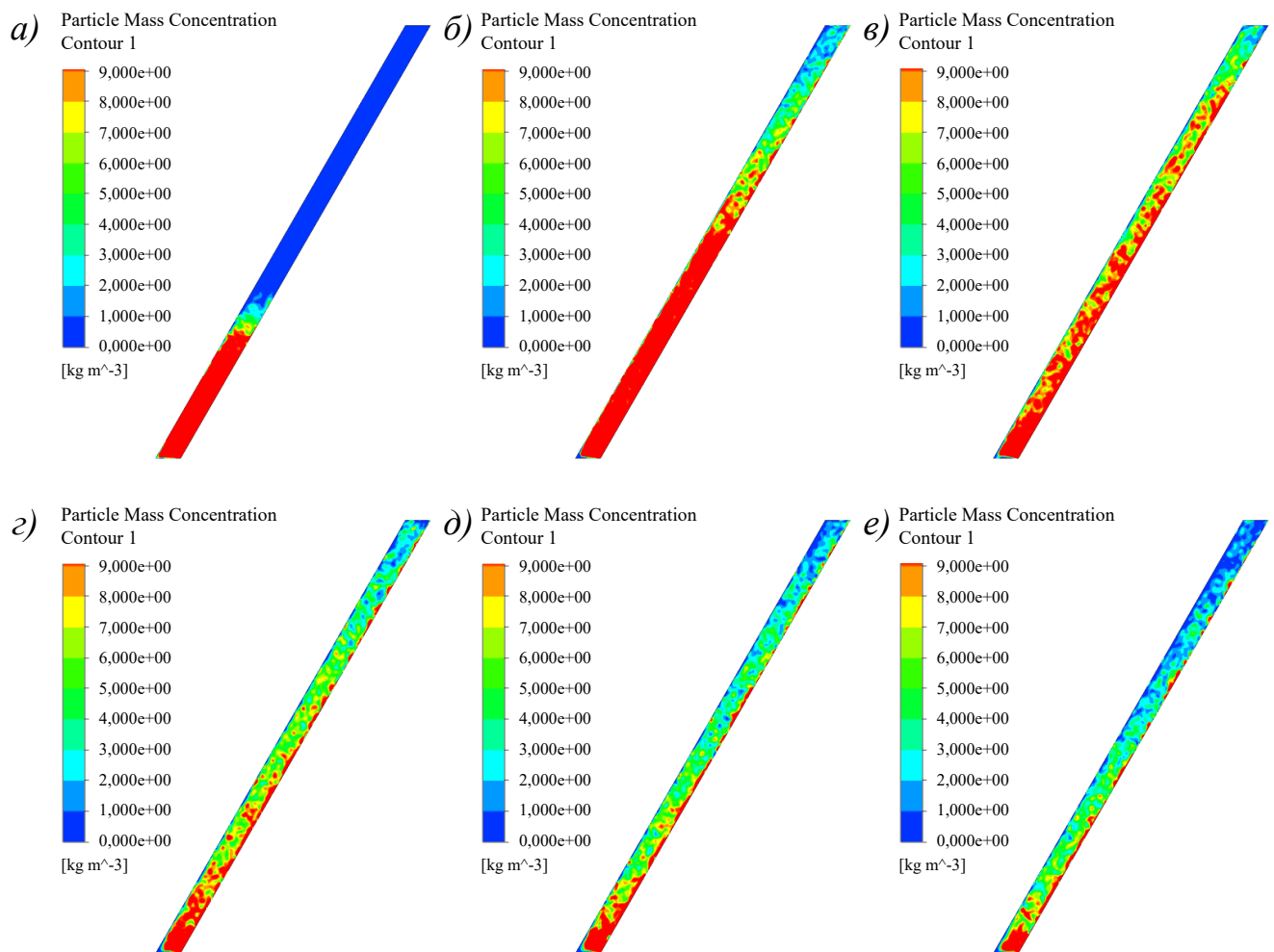


Рисунок 3.14 Концентрация частиц в классическом тонкослойном модуле при скорости  $u_{жс} = 0,005$  м/с в момент времени:

а)  $t=120$  с, б)  $t=280$  с, в)  $t=440$  с, г)  $t=600$  с, д)  $t=760$  с, е)  $t=920$  с.

На рисунке 3.15 представлено распределение турбулентной кинетической энергии внутри тонкослойного модуля. Анализ данных показывает, что на начальной стадии осаждения (рисунок 3.15 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 3.15 б). В стабильном состоянии (рисунок 3.15 в) высокая турбулентная кинетическая энергия сосредоточена только в канале движения сточных вод [47], 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.

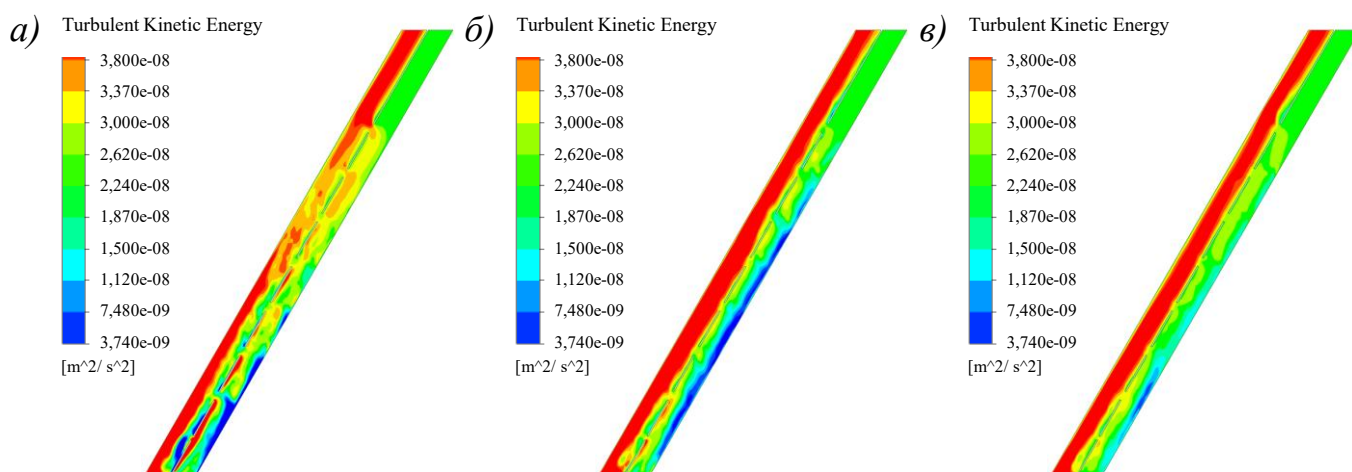


Рисунок 3.15 Турбулентная кинетическая энергия в тонкослойных модулях.

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

Полученные результаты легли в основу дальнейших вычислений и анализа, а также позволили оценить эффективность осаждения частиц.

Эффективность осаждения частиц можно оценить по следующей зависимости:

$$E_i = \left( 1 - \left( \frac{N_i}{N} \right) \right) \cdot 100\% \quad (3-13)$$

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{E_i \cdot M_{fi}}{100\%} \quad (3-14)$$

Где:  $N_i$  - количество частиц  $i$ -ой группы на выходе из модуля;

$N$  - общее количество частиц;

$M_{fi}$  - массовая доля частиц  $i$ -ой группы, %.

На рисунке 3.16 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. В то же время новый тонкослойный модуль всегда превосходит классический тонкослойный модуль при различных скоростях потока, увеличивая эффективность осаждения в среднем на 31,53 % по сравнению с классическим тонкослойным модулем [49].

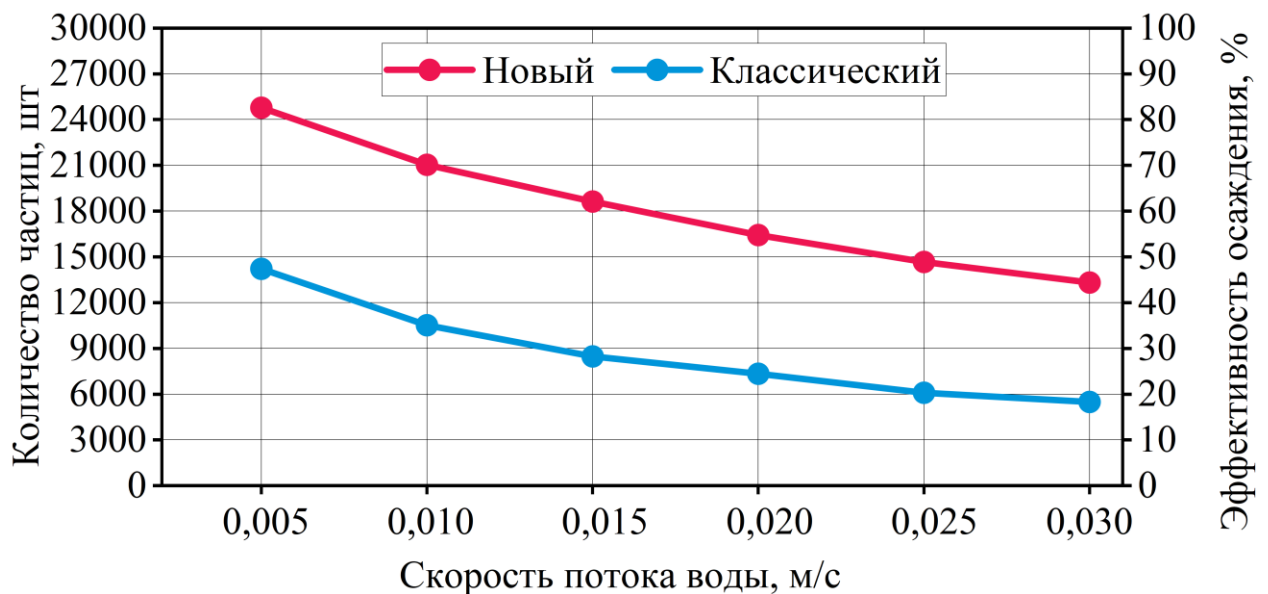
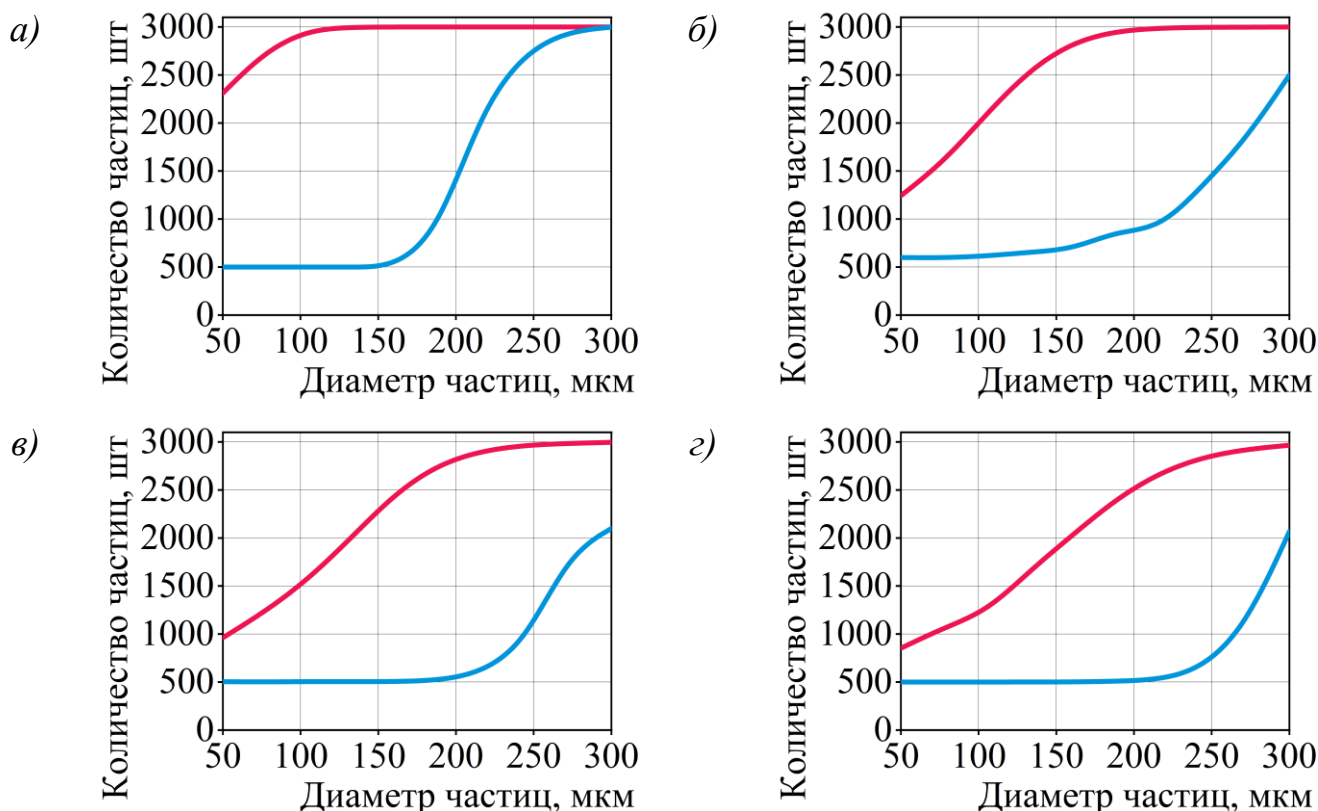


Рисунок 3.16 Зависимость между скоростью потока воды, количеством осажденных частиц и эффективностью осаждения

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 (рисунок 3.17). Подробные результаты представлены в Приложении Б.

Из рисунка 3.17 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 модулем 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. Важно отметить, что при различных скоростях потока воды и диаметрах частиц, новый модуль всегда превосходит классический тонкослойный модуль [49].



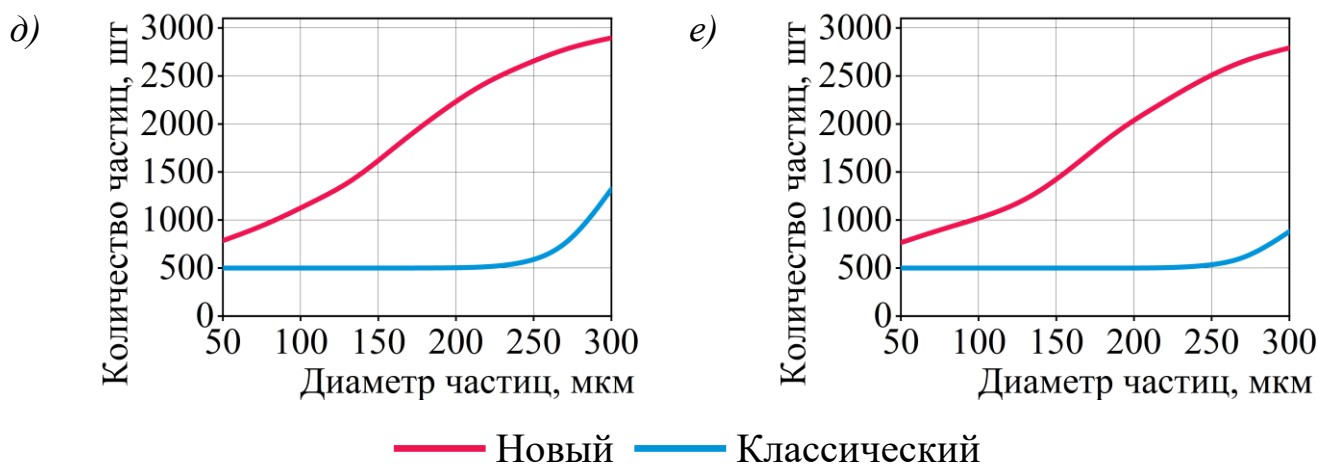


Рисунок 3.17 Зависимость количества осажденных частиц от диаметра частиц при различной скорости потока:

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

Также в данном исследовании было проведено 18 серий расчетов для анализа зависимости между отношением площади, занимаемой отверстиями к площади пластины –  $s\%$ , соотношением скоростей основного и увлекаемого потока –  $u\%$  и эффективностью осаждения. Условия моделирования представлены в таблице 3.4. Для расчета использовались частицы диаметром 50 - 300 мкм.

Таблица 3.4 Серия расчетов для определения эффективности осаждения в зависимости от  $d_{\text{ч}}$ ,  $u_{\text{жс}}$ ,  $u\%$  и  $s\%$

| № группы расчетов | № серия расчета | Скорость потока воды, $u_{\text{жс}}$ , м/с | Соотношение скоростей, $u\%$ | Соотношение площадей, $s\%$ | Диаметр частиц, $d_{\text{ч}}$ , мкм |
|-------------------|-----------------|---------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 1                 | 1               | 0,005                                       | 1                            | 0 - 100                     | 50 - 300                             |
|                   | 2               | 0,010                                       | 1                            | 0 - 100                     |                                      |
|                   | 3               | 0,015                                       | 1                            | 0 - 100                     |                                      |
|                   | 4               | 0,020                                       | 1                            | 0 - 100                     |                                      |
|                   | 5               | 0,025                                       | 1                            | 0 - 100                     |                                      |
|                   | 6               | 0,030                                       | 1                            | 0 - 100                     |                                      |
| 2                 | 7               | 0,005                                       | 0 - 2                        | 10                          |                                      |
|                   | 8               | 0,010                                       | 0 - 2                        | 10                          |                                      |
|                   | 9               | 0,015                                       | 0 - 2                        | 10                          |                                      |
|                   | 10              | 0,020                                       | 0 - 2                        | 10                          |                                      |
|                   | 11              | 0,025                                       | 0 - 2                        | 10                          |                                      |
|                   | 12              | 0,030                                       | 0 - 2                        | 10                          |                                      |

|   |    |       |       |         |  |
|---|----|-------|-------|---------|--|
| 3 | 13 | 0,005 | 0 - 2 | 0 - 100 |  |
|   | 14 | 0,010 | 0 - 2 | 0 - 100 |  |
|   | 15 | 0,015 | 0 - 2 | 0 - 100 |  |
|   | 16 | 0,020 | 0 - 2 | 0 - 100 |  |
|   | 17 | 0,025 | 0 - 2 | 0 - 100 |  |
|   | 18 | 0,030 | 0 - 2 | 0 - 100 |  |

Порядок математической обработки результатов исследования представлен на примере первой группы расчетов.

(1) Используя данные, полученные в результате математического моделирования, построен график (рисунок 3.18). Увеличение площади, занимаемой отверстиями при фиксированной величине увлекаемого расхода, приводит к снижению эффективности осаждения частиц. Это объясняется снижением средней скорости увлекаемого потока в области отверстий и сокращением зоны влияния вблизи отверстия, где может произойти захват частицы.

(2) Зависимость эффективности осаждения может быть выражена с помощью следующего уравнения полинома:

$$E = Au_{\text{ж}}^2 + Bu_{\text{ж}} + C \quad (3-15)$$

(3) Для каждого соотношения площадей получены значения коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$  (таблица 3.5).

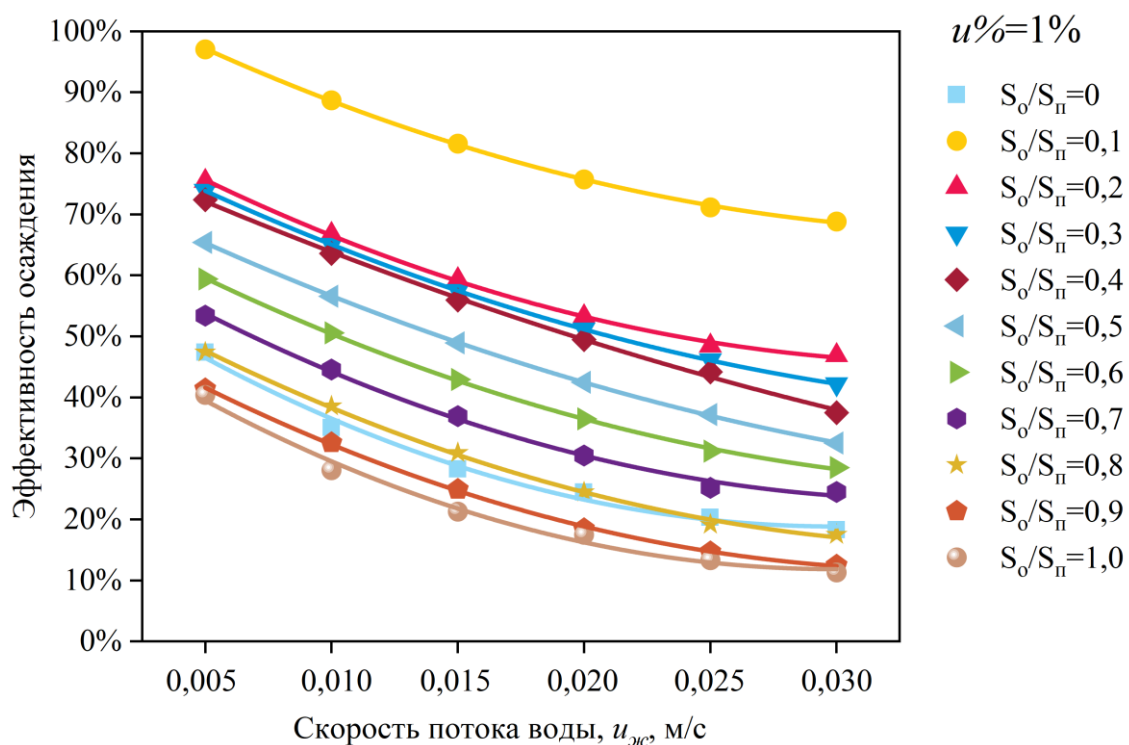


Рисунок 3.18 Зависимость эффективности осаждения от соотношения площадей  $s\%$

Таблица 3.5 Коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  для уравнения (3-15)

| $S\%$ | $A$   | $B$   | $C$ |
|-------|-------|-------|-----|
| 0     | 443,9 | -26,6 | 0,6 |
| 10    | 287,8 | -21,5 | 1,1 |
| 20    | 328,6 | -23,1 | 0,9 |
| 30    | 247,9 | -21,3 | 0,8 |
| 40    | 143,3 | -18,7 | 0,8 |
| 50    | 214,7 | -20,6 | 0,8 |
| 60    | 286,1 | -22,5 | 0,7 |
| 70    | 357,6 | -24,5 | 0,7 |
| 80    | 321,9 | -23,5 | 0,6 |
| 90    | 346,9 | -23,8 | 0,5 |
| 100   | 443,9 | -26,6 | 0,5 |

На основе данных таблицы 3.5 были построены корреляционные зависимости для каждого коэффициента от площади отверстий в пластине (рисунок 3.19). Далее эти зависимости можно подставить в уравнение (3-15). Окончательное выражение для оценки эффективности осаждения частиц примет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 E = & \left( 795,98733 \cdot (s\%)^2 - 743,4159 \cdot (s\%) + 404,25091 \right) \cdot u_{\text{жс}}^2 \\
 & + \left( -19,96498 \cdot (s\%)^2 + 18,09179 \cdot (s\%) - 25,03898 \right) \cdot u_{\text{жс}} \\
 & + \left( -0,62507 \cdot (s\%)^2 + 0,2749 \cdot (s\%) + 0,79979 \right)
 \end{aligned} \quad (3-16)$$

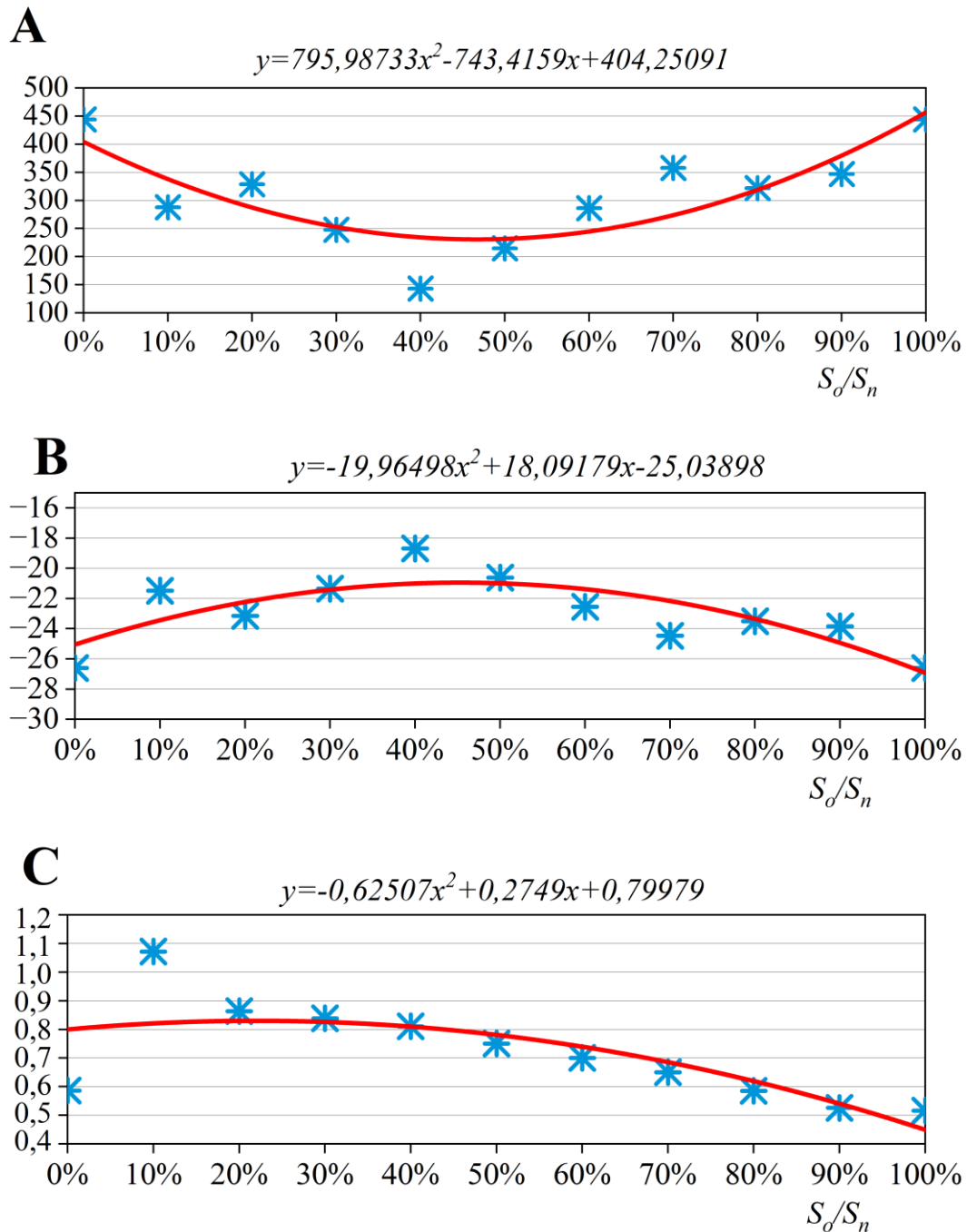


Рисунок 3.19 Зависимости значений коэффициентов А, В, С от значения параметра скорости потока воды  $u_{\text{жс}}$

(4) Для удобства анализа процесса осаждения формулу (3-16) можно представить в виде поверхности отклика (RSA) (рисунок 3.20). На графике красным цветом отмечена область высокой эффективности осаждения, которая достигается при минимальных скоростях движения потока от 0,005-0,01 м/с и площади, занимаемой отверстиями от 10 до 40%.

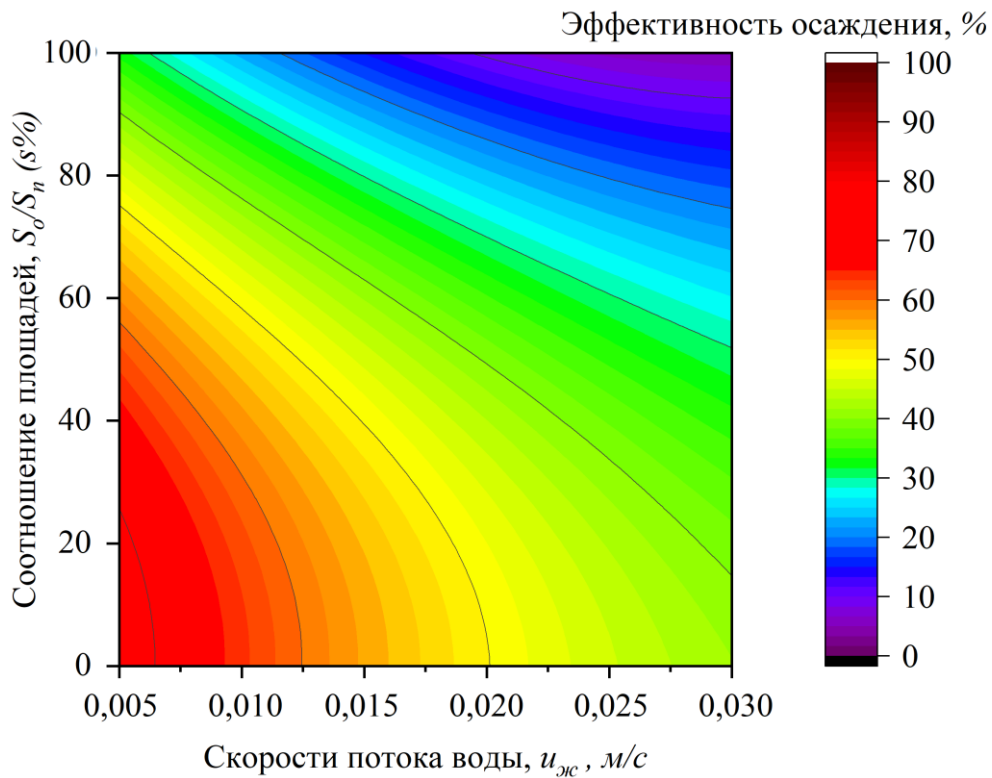


Рисунок 3.20 Зависимость эффективности осаждения при различных соотношениях площадей  $s\%$  и скорости потока воды  $u_{жс}$  для группы расчетов №1

На рисунке 3.21 показана поверхность отклика, полученная для второй группы расчетов математического моделирования (уравнение 3-17). Из представленных результатов видно, что эффективность осаждения увеличивается при увеличении соотношения скоростей. Следует отметить, что при соотношении скоростей более 0,0125, эффективность осаждения стабилизируется. Влияние соотношения скоростей на эффективность осаждения более выражено при более высоких скоростях потока воды [45].

$$\begin{aligned}
 E = & \left( -722428,8318 \cdot (u_{\text{жс}})^2 - 23421,3150 \cdot (u_{\text{жс}}) - 682,5808 \right) \cdot u\%^2 \\
 & + \left( 17047,8937 \cdot (u_{\text{жс}})^2 + 837,9354 \cdot (u_{\text{жс}}) + 21,8002 \right) \cdot u\% \\
 & + \left( 1189,8071 \cdot (u_{\text{жс}})^2 - 66,4349 \cdot (u_{\text{жс}}) + 1,0773 \right)
 \end{aligned}
 \quad (3-17)$$

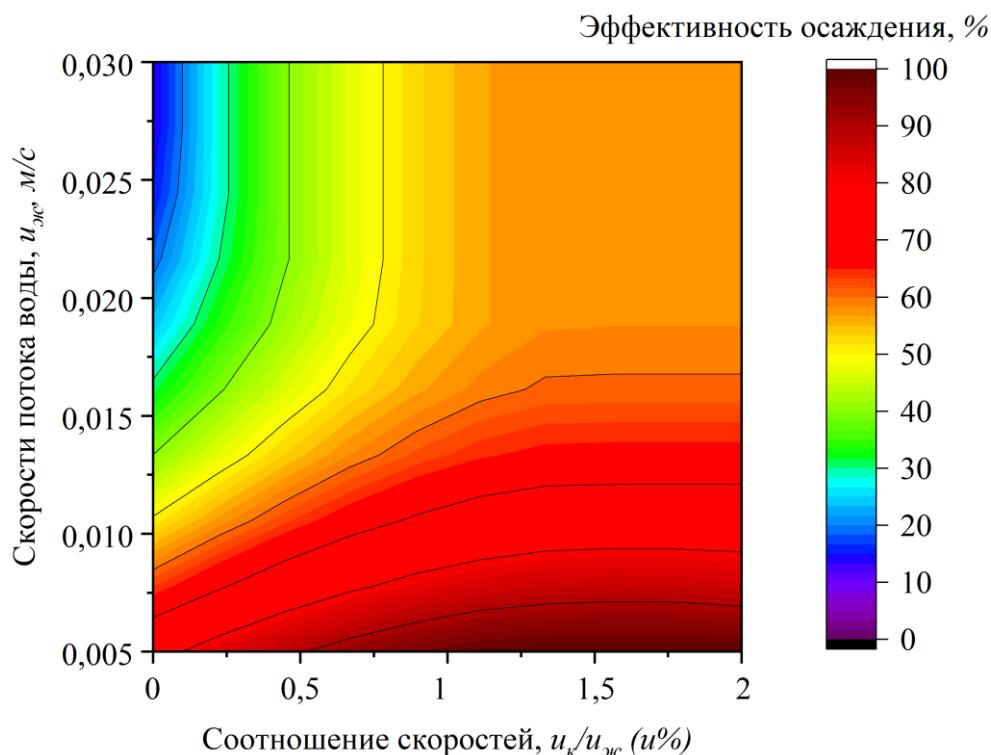


Рисунок 3.21 Зависимость эффективности осаднения при различных соотношениях скоростей  $u\%$  и скорости потока воды  $u_{\text{жс}}$  для группы расчетов №2

На рисунке 3.22 показаны поверхности, полученные в результате обработки результатов третьей группы расчетов математического моделирования (уравнение 3-18). Результаты показывают, что эффективность осаднения сначала увеличивается, а потом уменьшается с увеличением соотношения площадей. При увеличении соотношения скоростей основного и увлекаемого потока наблюдается аналогичная закономерность. Максимальная эффективность осаднения соответствует условию 10%-ой площади отверстий и величиной скорости увлекаемого потока 1% от скорости основного.

$$\begin{aligned}
 E = & \left( -864,7818 \cdot (s\%)^2 + 1337,3664 \cdot (s\%) - 852,4489 \right) \cdot u\%^2 \\
 & + \left( 21,0652 \cdot (s\%)^2 - 32,7277 \cdot (s\%) + 21,8948 \right) \cdot u\% \\
 & + \left( -1,0098 \cdot (s\%)^2 + 0,7792 \cdot (s\%) + 0,3079 \right)
 \end{aligned}
 \quad (3-18)$$

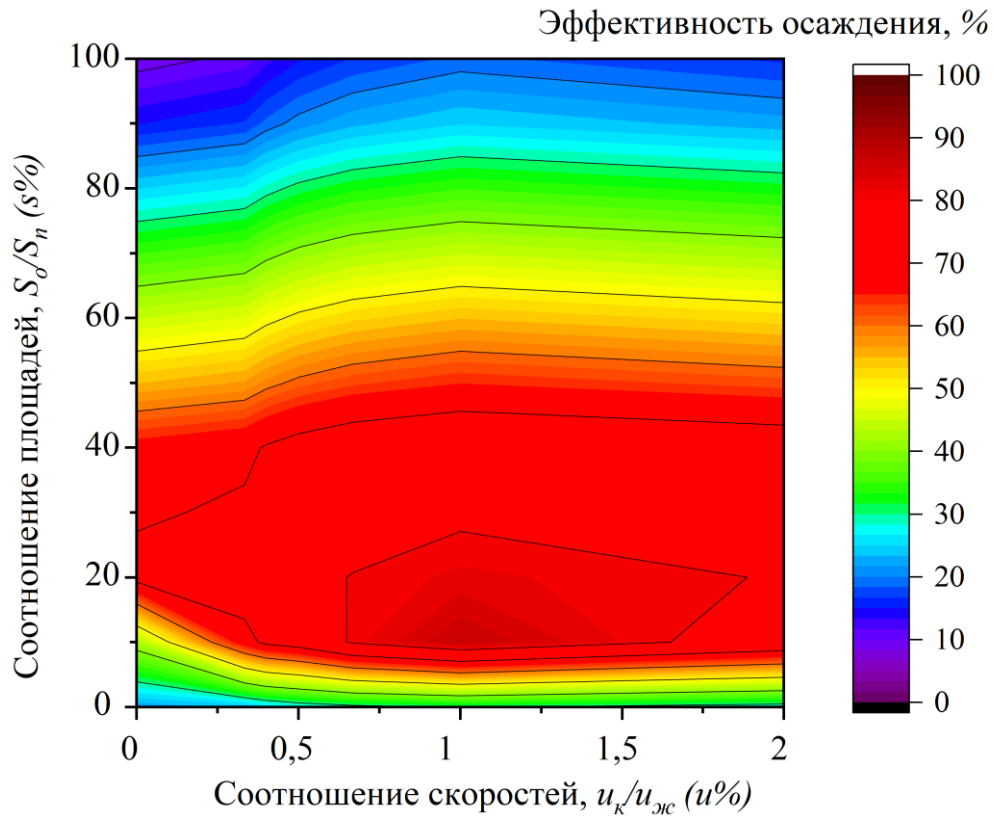


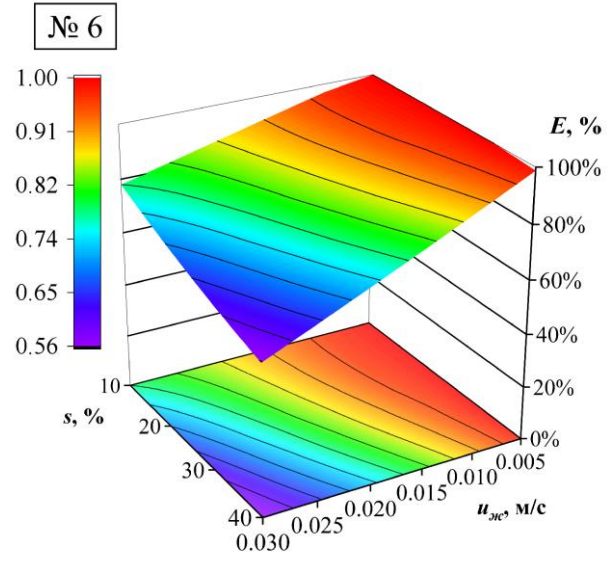
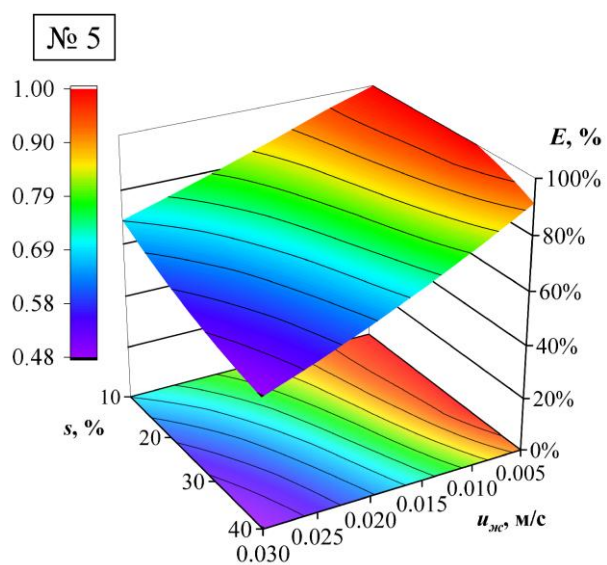
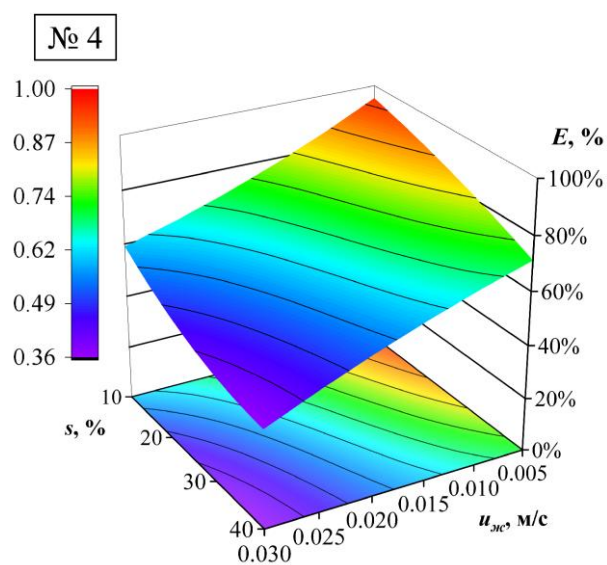
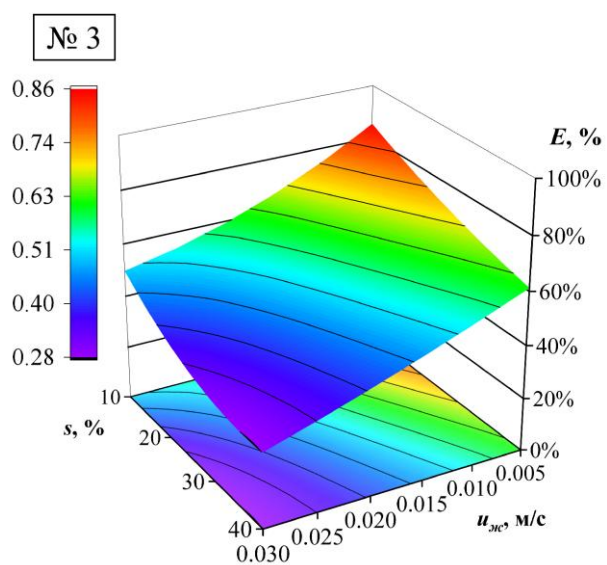
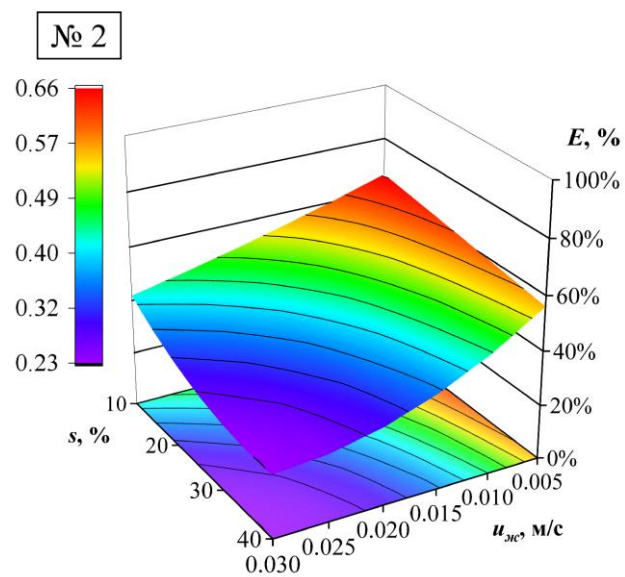
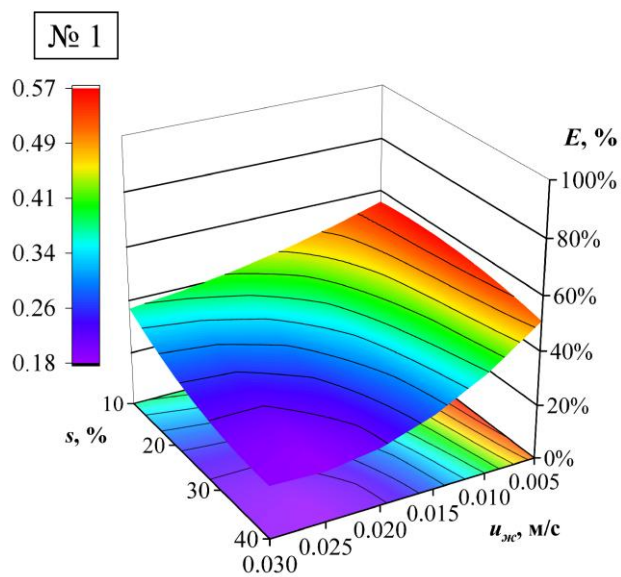
Рисунок 3.22 Зависимость эффективности осаждения при различных соотношениях площадей  $s\%$  и соотношениях скоростей  $u\%$  для группа расчетов №3

Руководствуясь поверхностью отклика, отметим, что высокая эффективность осаждения в тонкослойных модулях проявляется при соотношении площадей от 10 % до 40 %. Для определения точного значения соотношения площадей необходимы дополнительные экспериментальные исследования, которые учитывают влияние различного диаметра частиц на эффективность осаждения. В таблице 3.6 показаны настройки модели.

Таблица 3.6 Настройки модели, учитывающей влияние диаметра частиц на эффективность осаждения

| № серия расчета | Диаметр частиц, $d_{ч}$ , мкм | Скорость потока воды, $u_{ж}$ , м/с | Соотношение площадей, $s\%$ |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| 1               | 50-75                         | 0,005 ~ 0,030                       | 10 ~ 40                     |
| 2               | 75-100                        |                                     |                             |
| 3               | 100-125                       |                                     |                             |
| 4               | 125-150                       |                                     |                             |
| 5               | 150-175                       |                                     |                             |
| 6               | 175-200                       |                                     |                             |
| 7               | 200-225                       |                                     |                             |
| 8               | 225-250                       |                                     |                             |
| 9               | 250-275                       |                                     |                             |
| 10              | 275-300                       |                                     |                             |

Для 10 серий расчетов аналогично была построена поверхность отклика. На рисунке 3.23 представлены графики, полученные после математической обработки данных. Из рисунка видно, что максимальная эффективность осаждения во всех случаях соответствует минимальной скорости потока воды  $u_{ж}$ . В случае частиц диаметром менее 200 мкм (опыты №1–6) [47] максимальная эффективность достигается при отношении площадей 10%. За счет увлекающей способности удается повысить эффективность осаждения от 52 до 83 %. В случае частиц диаметром более 200 микрометров (опыты №7–10) сравнение результатов показывает, что область высокой эффективности практически равномерно располагается в рассматриваемом диапазоне отношения площадей и изменение этого параметра в меньшей степени оказывает влияние на эффективность осаждения частиц [47]. Подробные результаты представлены в Приложении В.



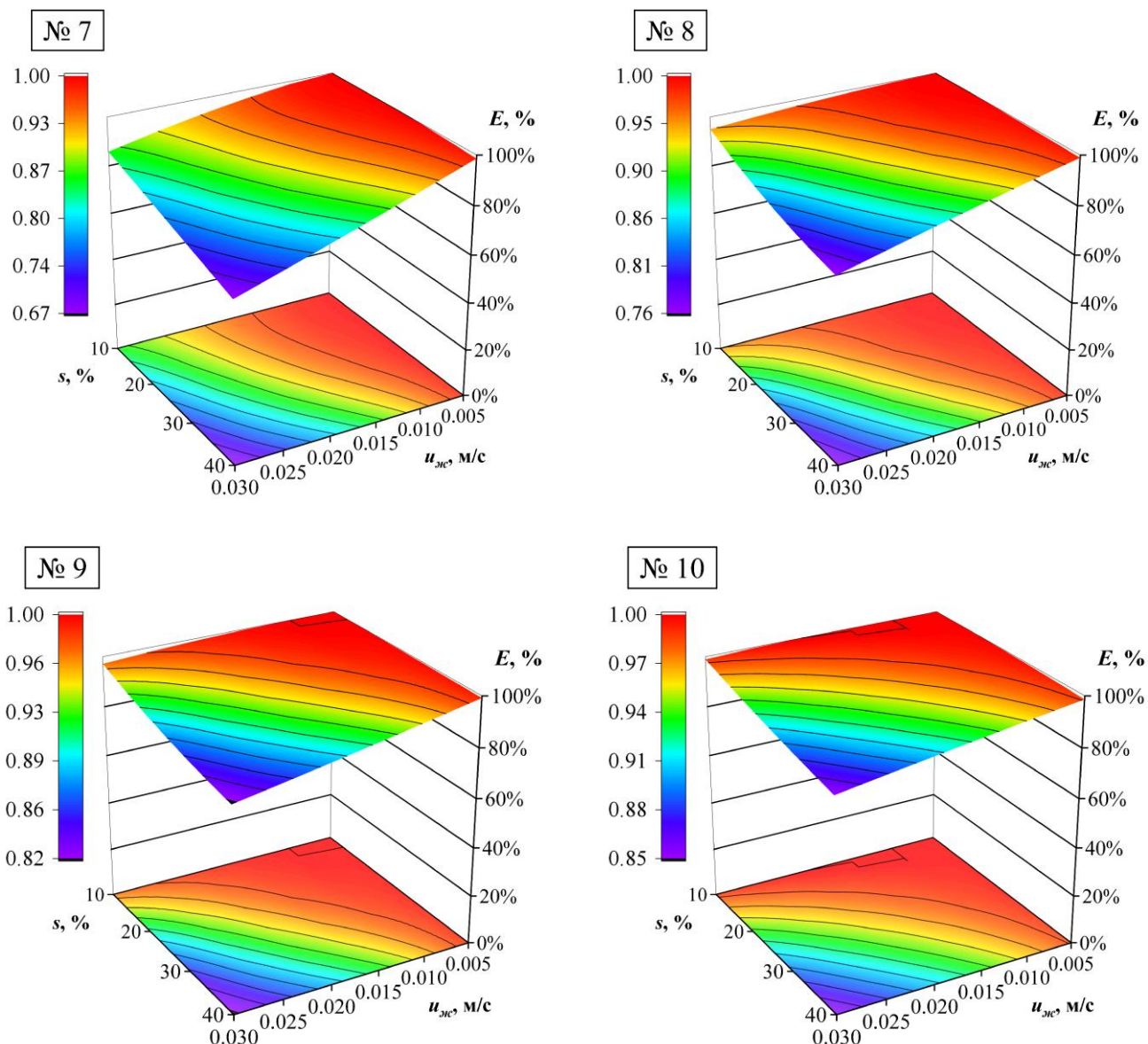


Рисунок 3.23 Зависимость эффективности осаждения при различных соотношениях площадей  $s\%$  и средней скорости потока воды  $u_{жс}$  и диаметра частиц:

1)  $d_q = 50-75$  мкм; 2)  $d_q = 75-100$  мкм; 3)  $d_q = 100-125$  мкм; 4)  $d_q = 125-150$  мкм; 5)  $d_q = 150-175$  мкм; 6)  $d_q = 175-200$  мкм; 7)  $d_q = 200-225$  мкм; 8)  $d_q = 225-250$  мкм; 9)  $d_q = 250-275$  мкм; 10)  $d_q = 275-300$  мкм

На рисунке 3.24 показаны линии тока и поле локальных скоростей потока в каналах движения воды и осадка для варианта средней скорости потока сточных вод  $u_{жс} = 0,03$  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 [45].

В процессе осаждения скатывающаяся по пластине частица может быть вторично подхваченадвигающимся потоком. Использование увлекающих отверстий позволит исключить этот процесс за счет захвата частиц, двигающихся вместе с восходящим потоком и частиц, скатывающихся по пластине вниз [45].

Подводя итог, отметим, что 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.

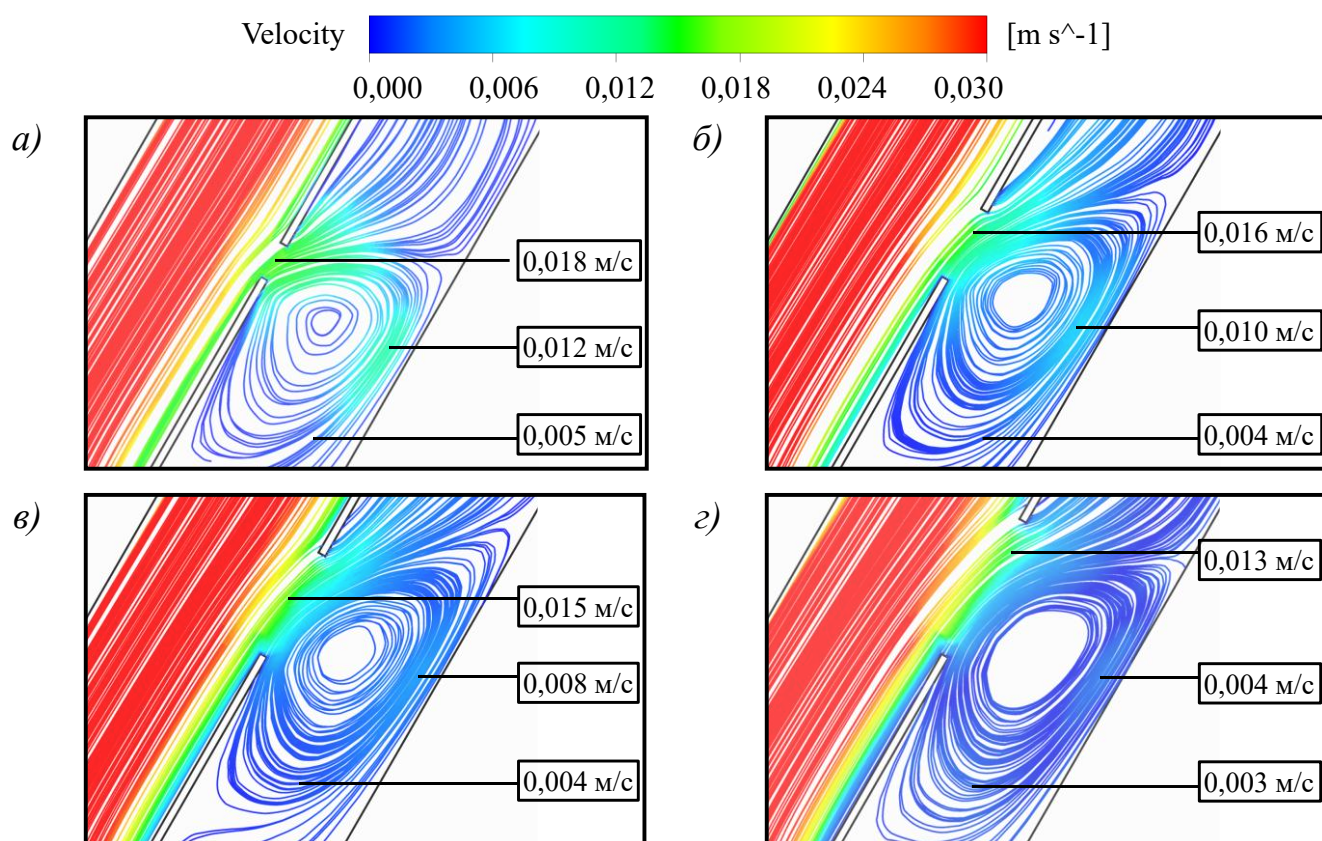


Рисунок 3.24 Скорость и траектория движения частиц

а) 10%, б) 20%, в) 30%, г) 40%.

Однако, для получения достоверных практических результатов необходимо провести оценку работы нового модуля в условиях производственного стока,

имеющего в своем составе органические соединения, оказывающие влияние на адгезионные свойства частиц.

### 3.3 Выводы

1. Рассмотрена работа нового тонкослойного модуля в условиях лабораторного эксперимента. Физическое моделирование подтвердило влияние увлекаемого потока на процесс осаждения взвешенных частиц. Сравнение конечной скорости осаждения частиц в эксперименте с величиной скорости, полученной с помощью предлагаемой теоретической модели, показало хорошую сходимость результатов. Погрешность результатов попала в диапазон от 1,22% до 1,87%.

2. При обеспечении эффективности очистки более 80%. Установлено соотношение между полным расходом загрязненной воды и расходом, направляемым в канал отведения осадка для обеспечения, увлекающего частиц эффекта:  $u_{жк} = 29,18u_k + 0,009$ .

3. В программе ANSYS FLUENT разработана математическая модель классического и нового тонкослойного модуля. Выполнено моделирование геометрии модуля, соответствующей размерам модели в лабораторном эксперименте. Сравнение результатов конечно-элементного анализа и эксперимента показало хорошую сходимость эффективности осаждения частиц. Для диапазона расхода потока от 0 до 125 мл/с. расхождение результатов попало в диапазон от 0,67 до 1,26%.

4. Установлены зависимости между площадью, занимаемой отверстиями, соотношением скоростей основного и увлекаемого потока воды и эффективностью осаждения взвешенных частиц. Увеличение эффективности осаждения достигается, если площадь отверстий попадает в диапазон от 10 до 40 %, а соотношение скорости увлекаемого потока к скорости основного потока составляет 1%.

5. Подтверждена возможность повышения эффективности осаждения частиц с использованием новой конструкции тонкослойного модуля. По сравнению с классической конструкцией модуля вновь предлагаемая позволяет теоретически повысить эффективность осаждения в среднем на 31,53 %.

## ГЛАВА 4 ПОЛУПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИСПЫТАНИЕ НОВОГО ТОНКОСЛОЙНОГО МОДУЛЯ, РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

### 4.1 Полупроизводственный эксперимент

#### 4.1.1 Характеристики установки

Промышленная модель нового тонкослойного модуля показана на рисунке 4.1 и 4.2. Емкость отстойника и тонкослойный модуль выполнены из ориентированно-стружечной плиты (ОСП-3) толщиной 11 мм, внутренняя поверхность дополнительно защищена гидроизоляционным покрытием. Габаритные размеры модуля составляют: 1900×1000×1000 мм (длина×ширина×высота). Межпластинчатое расстояние принималось равным 50 мм [158]. Угол наклона пластины составлял 60°. 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 [45]. Для обеспечения требуемого расхода воды к каналу осадка осуществлялось подключение трубопровода диаметром 25 мм с насосом. Для регулирования скорости увлекаемого потока на трубопроводе предусматривался шаровый кран. С учетом разницы гидравлических сопротивлений в отдельных трубопроводах, локальная скорость увлечения может варьироваться в различных частях модуля. Поэтому в расчетах используется усредненная скорость увлекаемого потока.

Кроме емкости отстойника производственная установка включала накопительный резервуар с мешалкой, резервуар чистой воды и резервуар осадка (рисунок 4.2). В приемном резервуаре с мешалкой обеспечивалось приготовление производственных сточных вод. Для эксперимента использовались сточные воды предприятия пищевой промышленности. Состав сточных вод принимался на основании данных работы [170]. Из накопительного резервуара насосом сточная вода подавалась в распределительный канал отстойника, проходила процесс отстаивания и удалялась самотеком в резервуар чистой воды.

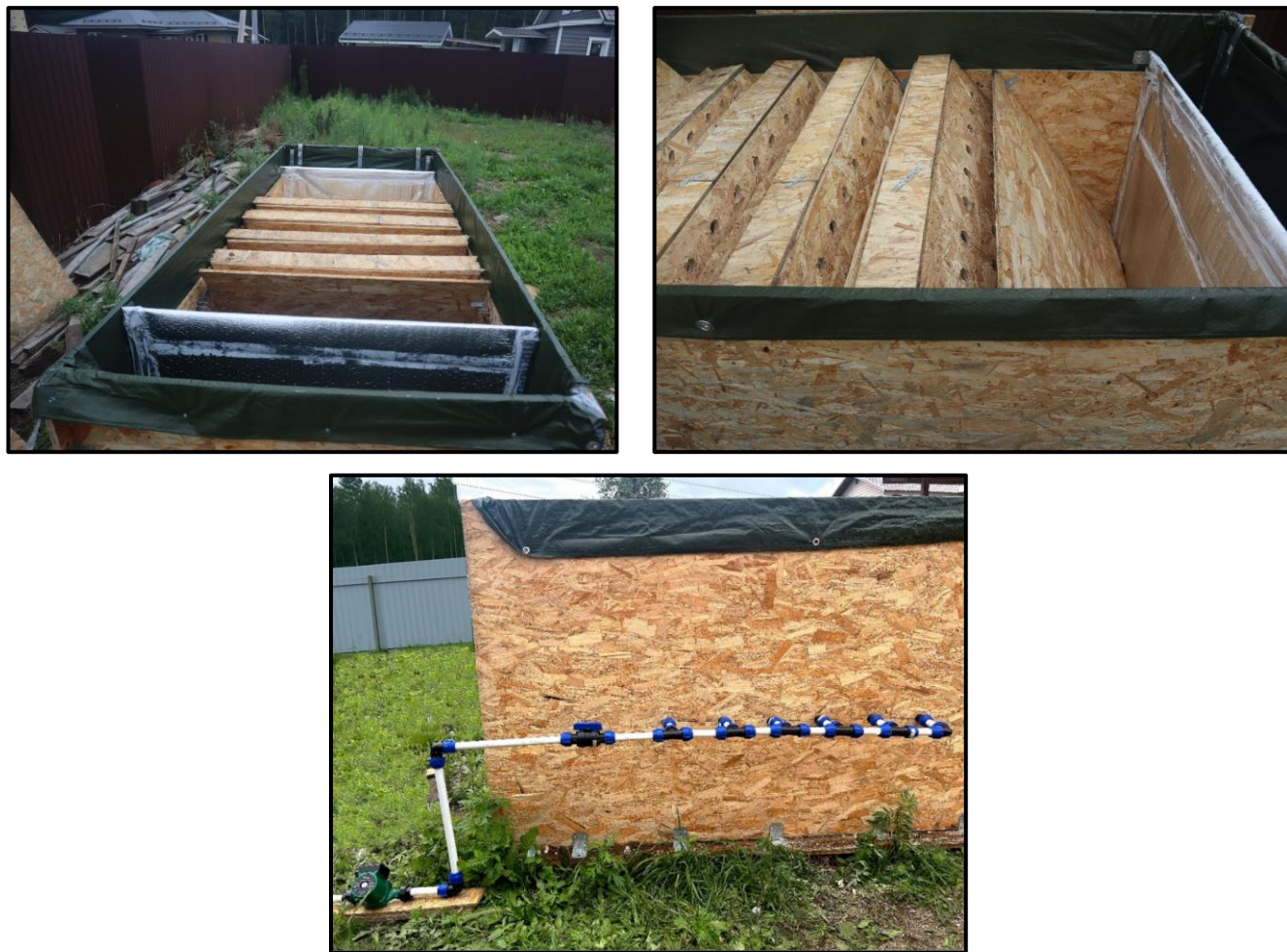


Рисунок 4.1 Фотографии полупроизводственной установки отстойника с тонкослойным модулем новой конструкции

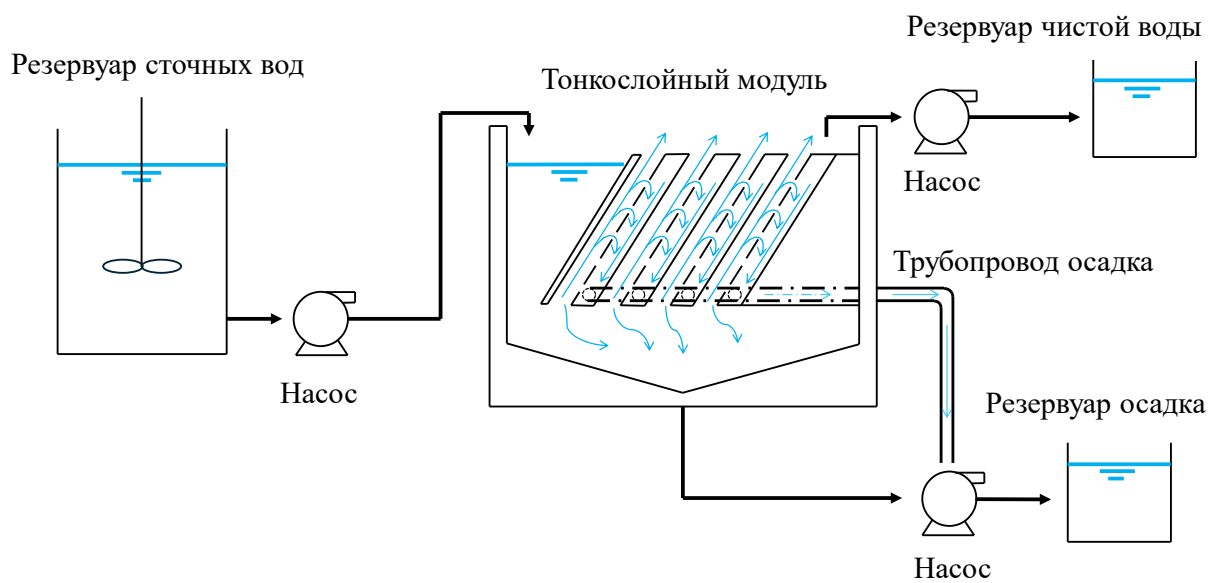


Рисунок 4.2 Схема полупроизводственной установки отстойника с тонкослойным модулем новой конструкции

#### 4.1.2 Планирование эксперимента

Методика исследования основывалась на измерении значений ХПК на входе и выходе тонкослойного модуля, а также на определении мутности загрязненной воды до и после очистки.

Для определения значений ХПК применялся колориметр Rocker LEI-5000 (рисунок 4.3). Измерения мутности воды проводились с использованием портативного мутномера 2100Q IS (рисунок 4.4).



Рисунок 4.3 Колориметр для определения ХПК Rocker LEI-5000



Рисунок 4.4 Портативный мутномер 2100Q IS

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 чистой 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 4.1.

Таблица 4.1 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      |             |                       |

#### 4.1.3 Анализ экспериментальных результатов

Результаты экспериментов показаны на рисунке 4.5 - 4.6. На графиках отражается зависимость эффективности очистки взвешенных веществ и ХПК в течении времени эксперимента для различных конструкций отстойника. Результаты измерений представлены в Приложении Г.

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. Предложенный в данном исследовании новый тонкослойный модуль демонстрирует значительные преимущества по сравнению с классическим тонкослойным модулем. По сравнению с отстойниками без тонкослойного модуля эффективность очистки повышается на 20 – 31 %, а по сравнению с классическим

тонкослойным модулем — на 8 – 20 % [49]. Следует отметить, что новый тонкослойный модуль обеспечивает высокую эффективность очистки во всем диапазоне исследованных концентраций взвешенных веществ, в том числе при высоких концентрациях взвешенных веществ [46].

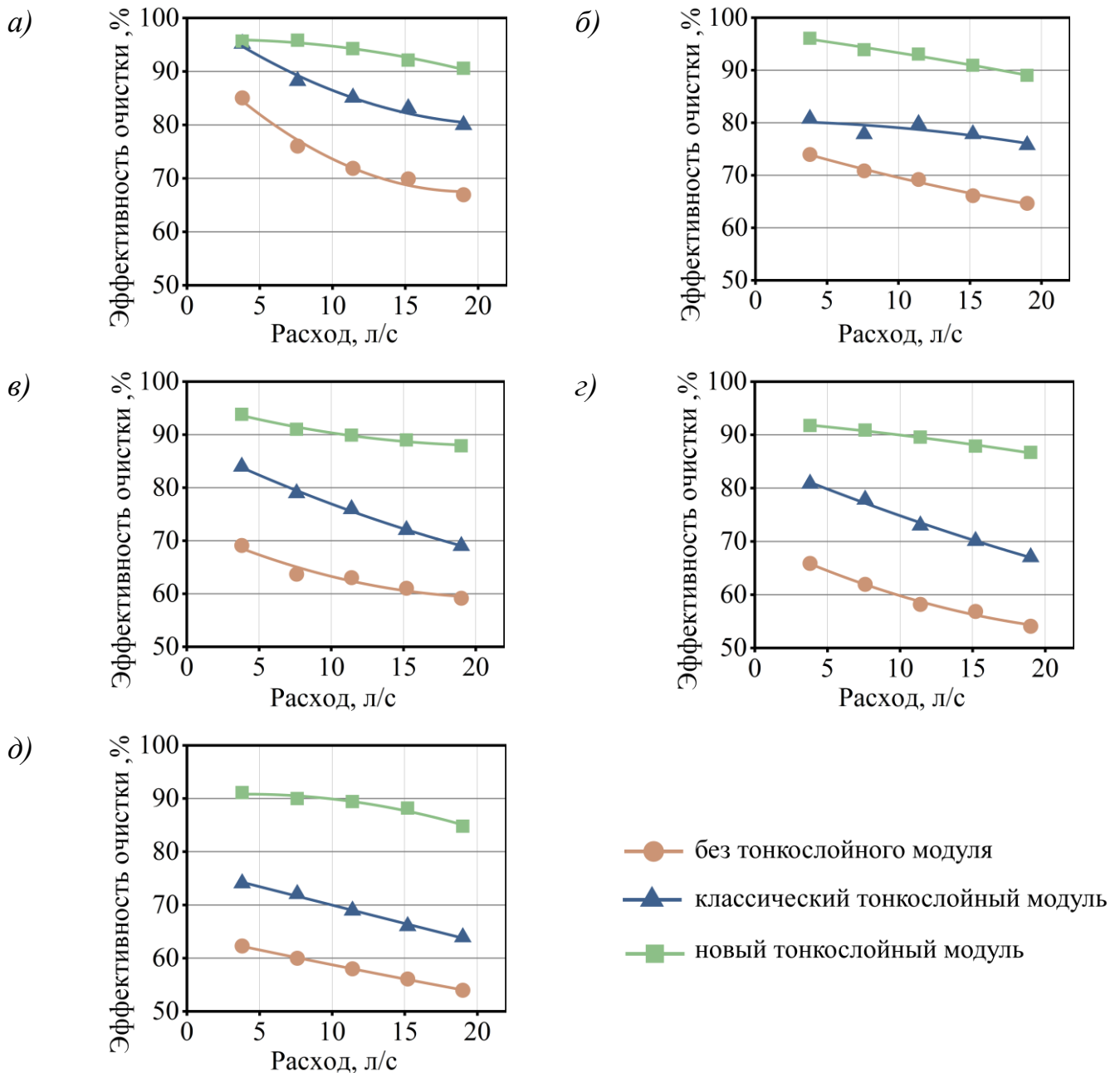


Рисунок 4.5 Зависимость эффективности очистки взвешенных веществ от расхода воды с исходной концентрацией взвешенных веществ:

а) 2000 мг/л; б) 3000 мг/л; в) 4000 мг/л; г) 5000 мг/л; д) 6000 мг/л.

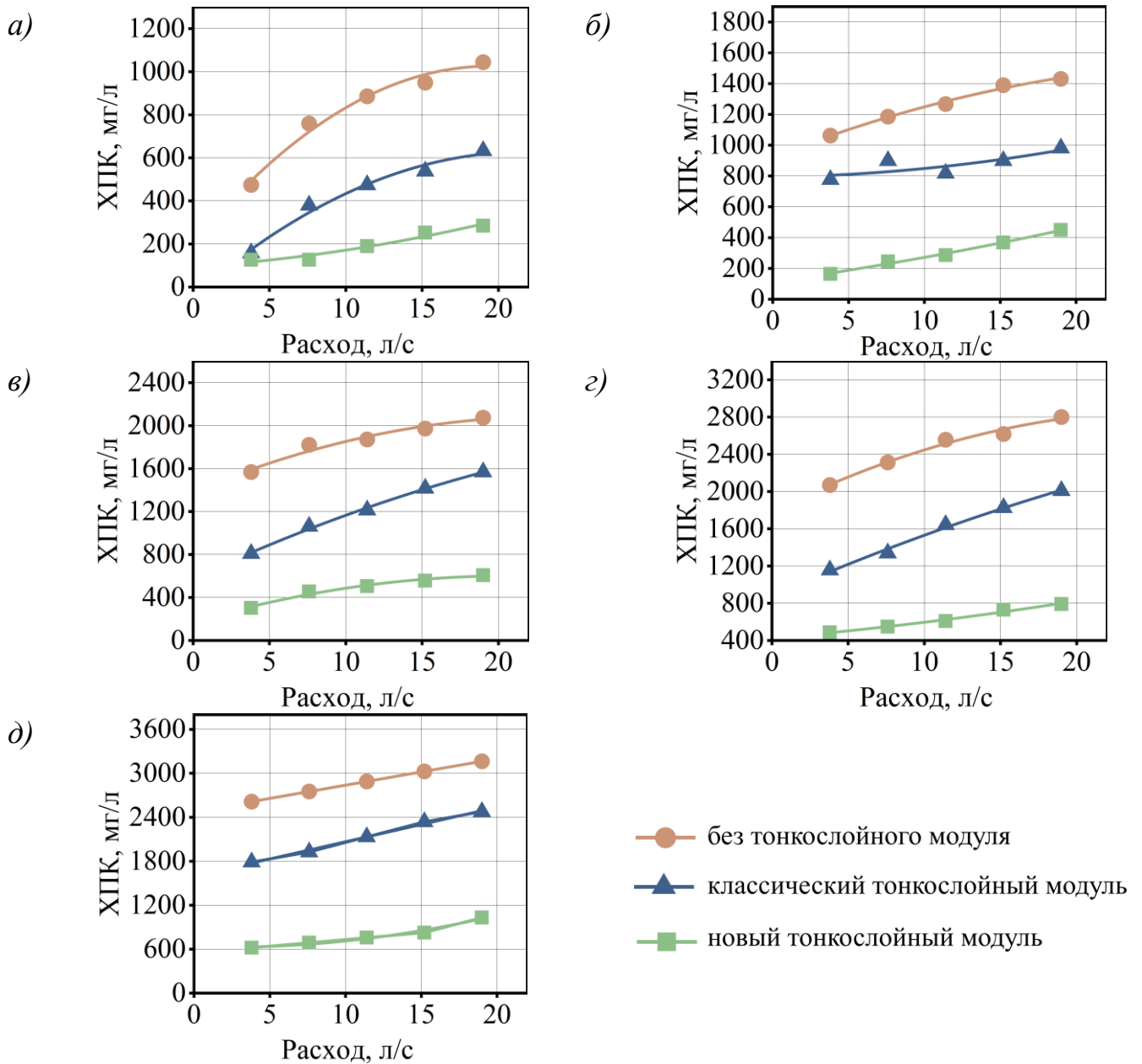


Рисунок 4.6 Зависимость ХПК от расхода воды

а)  $\text{ХПК}=3163 \text{ мг/л}$ ; б)  $\text{ХПК}=4087 \text{ мг/л}$ ; в)  $\text{ХПК}=5058 \text{ мг/л}$ ; г)  $\text{ХПК}=6086 \text{ мг/л}$ ; д)  $\text{ХПК}=6878 \text{ мг/л}$ .

## 4.2 Методика расчета геометрических параметров тонкослойных модулей

Методика и рекомендации для проектирования нового модуля основаны на данных, полученных из физических и математических моделей, а также требований основных нормативных документов в области водоснабжения и водоотведения [40].

В данном исследовании в качестве примера рассматривается отстойник с

тонкослойным модулем противоточного типа. Рассмотрим основные этапы его расчета:

#### 1) Определение исходных данных

Основные расчетные параметры отстойников: коэффициент использования объема, рабочая глубина отстойной части, ширина, скорость потока, уклон днища к бункеру осадка, надлежит принимать руководствуясь таблицей (31) в источнике [40].

#### 2) Определение параметров тонкослойного модуля

Для обеспечения экономической выгоды размеры 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 [39]. Минимально допустимые размеры тонкослойных модулей могут быть регламентированы требованиями нормативных документов [40, 92, 38, 17, 36] для высоты, длины и расстояния между пластинами. Для увлекаемого потока необходимо учесть рекомендуемое соотношение площади отверстий к площади наклонной пластины. На рисунке 4.7 показано расположение отверстий в разделительной пластине. Необходимо расположить отверстия равномерно по всей поверхности пластины. Площадь отверстий можно рассчитать, как 10 % от площади пластины. В таблице 4.2 приведены рекомендуемые диаметры отверстий и количество отверстий для обычных наклонных пластин, при обеспечении эффективности очистки выше 80%.

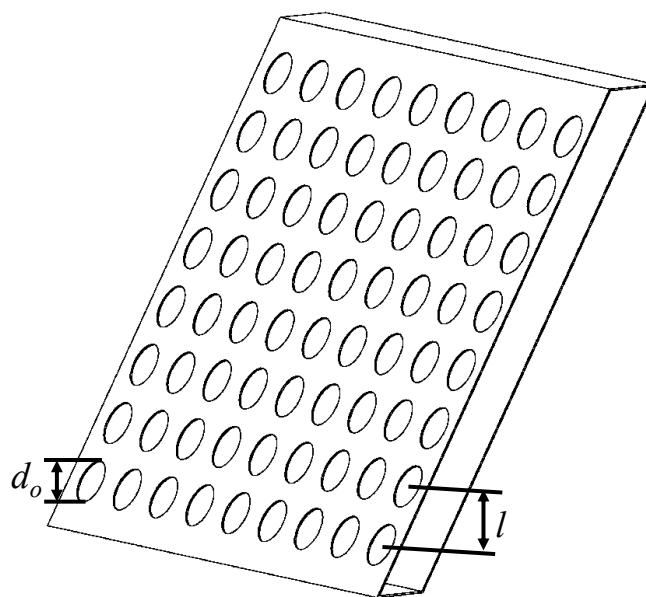


Рисунок 4.7 Расположение отверстий на тонкослойном модуле

Таблица 4.2 Рекомендуемое значение  $d_o$ 

| Размеры пластины<br>(Длина, м x Ширина, м) | 0,8 x 0,5 | 1 x 0,6 | 1 x 0,75 | 1,2 x 0,6 | 1,2 x 0,8 | 1,5 x 0,75 | 2,0 x 1,0 |
|--------------------------------------------|-----------|---------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|
| Диаметр отверстия, $d_o$ , м               | 0,043     | 0,047   | 0,036    | 0,041     | 0,040     | 0,047      | 0,039     |
| Количество отверстий,<br>шт.               | 28        | 35      | 72       | 55        | 77        | 64         | 171       |

### 3) Определение скорости потока сточных вод и скорости увлекаемого потока

Скорость увлекаемого потока в канале движение осадка определяется по уравнению (3-5) при известной скорости потока сточных вод. В таблице 4.3 приведены рекомендуемые скорости увлечения воды с учетом рекомендуемого диапазона скорости сточных вод в тонкослойном модуле [191].

Таблица 4.3 Величина скорости увлекаемого потока  $u_k$  для  $u_{жс} = 0.01 - 0.03$  м/с.

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

#### 4) Расчет потери напора

В процессе работы тонкослойного отстойника общие потери напора включают потери на трение вдоль пути потока и местные сопротивления на входе, выходе и в местах прохождения увлекаемой воды через отверстия.

Общие потери напора в канале сточных вод рассчитываются по уравнению Дарси-Вейсбаха с учетом коэффициентов местного сопротивления:

$$h_c = h_l + \sum h_m = \left( \lambda \frac{L}{D_h} + \zeta_{вход} + \zeta_{выход} \right) \frac{u_{жс}^2}{2g} \quad (4-1)$$

Где:  $h_l$  - потери напора на трение по длине канала, м;

$\sum h_m$  - сумма потерь на местные сопротивления, м;

$\lambda$  - коэффициент гидравлического трения (определяется в зависимости от числа Рейнольдса  $Re$  и шероховатости материала пластин);

$L$  - длина тонкослойного модуля, м;

$D_h$  - гидравлический диаметр канала, м;

$\zeta_{вход}$ ,  $\zeta_{выход}$  - коэффициенты локального сопротивления на входе и выходе тонкослойного модуля.

Следует также отметить, что новые тонкослойные модули оснащены перфорированными пластинами. Потери напора в перфорированной стенке теоретически рассчитываются на основе закономерностей течения воды через затопленные отверстия в тонкой стенке:

$$\Delta h_o = \zeta_k \frac{u_k^2}{2g} \quad (4-2)$$

Где:  $\zeta_k$  - Коэффициент локального сопротивления перфорированной пластины (Диапазон 2,60–2,78) [21].

Для обеспечения работы тонкослойного модуля перепад давления, создаваемый в канале движения осадка, должен строго компенсировать потери напора ( $\Delta h_o$ ) при прохождении потока через перфорированную пластину и общие потери напора в канале сточных вод ( $h_c$ ).

#### 5) Определение габаритов нового модуля

В новом тонкослойном модуле в связи с устройством каналов движения осадка требуется увеличение ширины межпластиночного пространства. С геометрической точки зрения это приводит к увеличению объема одного тонкослойного модуля на 100 % по сравнению с классической конструкцией.

При определении общих габаритных размеров (длины, ширины и высоты) тонкослойного модуля решающим фактором является требуемая площадь осаждения, которая зависит от гидравлической нагрузки. Согласно результатам главы 2, эффект увлекающего потока в каналах движения осадка увеличивает скорость осаждения ( $u_{\text{ч}}$ ) на 30 %.

Согласно классической теории отстаивания, требуемая площадь поверхности обратно пропорциональна скорости осаждения. Таким образом, для обеспечения заданной производительности ( $Q$ ) отстойника с тонкослойными модулями общее количество новых тонкослойных модулей можно уменьшить на 25 %, а габаритные размеры увеличить на 50 %.

#### 4.3 Экономическое обоснование использования нового тонкослойного модуля

В данном разделе представлен сравнительный экономический анализ строительства и эксплуатации отстойника с новым тонкослойным модулем и широко применяемого в настоящее время классического аналога. Стоимость очистки рассчитывается как удельный показатель на единицу объема очищенной воды (1 м<sup>3</sup>). Расчет основан на принципе приведения затрат к единице производительности, что позволяет учесть разницу в эффективности очистки.

*Капитальные затраты,  $K_{\text{ср}}$*

По данным обзора рынка и типичных прайс-листов, стоимость заводских модульных тонкослойных отстойников варьируется в широких пределах. По результатам анализа усредненная величина капитальных вложений для классического тонкослойного модуль сооружений составляет **1 850 000 руб** (срок службы отстойника составляет 20 лет). при расчетной производительности отстойника **600 м<sup>3</sup>/сут ( $Q$ )** [159]. Однако капитальные затраты на новые тонкослойные модули в 1,5 раза больше,

чем на классические конструкции.

Тогда капитальные затраты составляют:

- Для классического: 1 850 000 руб.
- Для нового: 2 775 000 руб.

#### *Эксплуатационные затраты*

Эксплуатационные затраты включают в себя расходы, связанные с обслуживанием и очисткой отстойников, амортизационные отчисления, текущий ремонт и неучтенные расходы [30].

$$C_{op} = C_d + C_r + C_m + C_u \quad (4-3)$$

А) Амортизационные отчисления,  $C_d$ .

Руководствуясь данными источника [5] срок службы отстойника составляет  $n = 20$  лет. Ставка дисконтирования принимается  $i = 0,12$ . Размер отчислений может быть оценен по формуле [34]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4-4)$$

$$C_d = K_{cp} \times CRF \quad (4-5)$$

Где:  $CRF$  - коэффициент восстановления капитала;

- Для классического: 247 715 руб.
- Для нового: 371 572,5 руб.

Б) Текущий ремонт,  $C_r$ .

Текущий ремонт рассчитывается в соответствии с коэффициентом ремонта  $r=0,015$  [12].

Объем отчислений на текущий ремонт может быть определен по следующей формуле [15]:

$$C_r = r \times K_{cp} \quad (4-6)$$

- Для классического: 27 750 руб.

- Для нового: 41 625 руб.

В) Затраты на обслуживание модуля,  $C_m$ .

Техническое обслуживание тонкослойных модульных отстойников осуществляется рабочей бригадой из 5 человек. Поскольку такие бригады обслуживают в среднем около 20 сооружений, коэффициент количества обслуживаемых объектов принимается равным 0,05. Новые тонкослойные модули менее подвержены засорению и требуют минимального технического обслуживания; для контроля их работы достаточно одного оператора. Вычисления выполняются по следующей формуле:

$$C_m = N_m \times W \times 12 \times 0,05 \quad (4-7)$$

Где:  $N_m$  - количество работников;

$W$  - средняя месячная зарплата, 121 250 руб [42].

- Для классического: 363 750 руб.

- Для нового: 72 750 руб.

Г) Неучтенные расходы,  $C_u$ .

Неучтенные затраты обычно рассчитываются как процент эксплуатационных затрат:

$$C_u = (C_m + C_d + C_r) \times \gamma \quad (4-8)$$

Где:  $\gamma$  - коэффициент неучтенных затрат, установленный на 10%.

- Для классического: 63 921,5 руб.

- Для нового: 48 594,8 руб.

Необходимо просуммировать все затраты и рассчитать удельную стоимость очистки 1 м<sup>3</sup> воды. Классические тонкослойные модули склонны к засорению, поэтому их необходимо очищать четыре раза в год, каждый раз останавливая систему на двое суток. Новые тонкослойные модули требуют очистки один раз в год, с остановкой системы всего на одни сутки.

$$S_{op} = \frac{K_{cp} / n + C_{op}}{Q \times N_z} \quad (4-9)$$

Где:  $Q$  - расход сточных вод, поступающих на очистку, м<sup>3</sup>/сут;

$N_z$  - Количество дней работы в году.

- Для классического: 3,71 руб.

- Для нового: 3,11 руб.

Таким образом, затраты на очистку 1 м<sup>3</sup> сточных вод с использованием классического модуля составляют **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 м<sup>3</sup>/сут эксплуатационные расходы при применении новой конструкции тонкослойного отстойника снизятся на 10,95 млн руб/год.

#### 4.4 Выводы

1. Апробация тонкослойного модуля на полупроизводственной установке показала, что применение модуля с эффектом увлечения взвешенных частиц в канал осадка по сравнению с традиционными конструкциями позволяет повысить эффективность осаждения на 8–20 %.

2. На основе результатов физического и математического моделирования получены расчетные зависимости для подбора оптимальных геометрических параметров тонкослойного модуля, позволяющий инженерам определять геометрические размеры и расчетные параметры конструкции.

3. Анализ экономической эффективности показал, что применение нового тонкослойного модуля обеспечивает снижение удельных затрат на очистку сточных вод на 0,6 руб./м<sup>3</sup>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложена новая конструкция тонкослойного модуля, направленная на улучшение эффективности отделения частиц от потока в межпластинчатом пространстве. Межпластиночное пространство классического тонкослойного модуля разделяется на два отдельных проточных канала: канал, предназначенный для движения загрязненной воды и канал для приема и удаления осадка. Канал осадка выполнен в виде замкнутого пространства и соединен в нижней части общей трубой выгрузки осадка, на которой располагается регулирующий клапан. 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. В канале удаления осадка обеспечивается отведение увлекаемого потока воды, способствующего быстрому осаждению взвешенных частиц и повышению эффективности разделения. В исследовании были использованы методы физического и математического моделирования, которые подтвердили эффективность очистки тонкослойного модуля и позволили определить оптимальные характеристики его работы.

Проблема повышения эффективности осаждения в тонкослойных модулях получила широкое внимание в мировой научной практике, в том числе в Китае. В настоящее время исследования не привели к созданию единого и эффективного решения: классические тонкослойные модули по-прежнему широко применяются, однако процесс осаждения частиц в них остается сложным и многофакторным, а также сопровождается проблемами засорением и неравномерной гидравлической нагрузкой. Эти проблемы не только снижают эффективность очистки, но и могут вызывать вынужденные остановки работы очистных сооружений. Поэтому результаты, полученные в настоящей работе, имеют практическую значимость и могут быть рекомендованы для последующего внедрения.

Ниже приведены основные выводы 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:  $u_{жс}=29,18u_k+0,009$ , 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 м<sup>3</sup> сточных вод по сравнению с классической конструкцией.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абитаев, М. Т. Очистка природных и сточных вод в больших городах с применением тонкослойных отстойников / сост. М. Т. Абитаев, Л. А. Евсеева, О. Я. Евсеева. – М. : МГЦНТИ, 1983. – 29 с. – (Проблемы больших городов).
2. Бабаев, И. С. Технология и оборудование для очистки высокомутных природных вод : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Бабаев И. С. ; Госстрой СССР, ВНИИ ВОДГЕО. – М., 1986. – 52 с.
3. Белова Л. В. Технологические решения в области промышленного водопользования и очистки сточных вод предприятий Тюменской области / Л. В. Белова, Е. И. Вялкова, О. В. Сидоренко, Е. С. Коршикова. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2026. – 181 с. – ISBN 978-5-9961-3632-2.
4. Ван Д. Численное моделирование пропускной способности деформированного канализационного коллектора с целью обоснования применения метода CIPP для его ремонта / Д. Ван, Л. Д. Терехов, Е. Л. Терехова, Ш. Б. Майны // Вестник гражданских инженеров. – 2025. – № 5 (112). – С. 59–66. – DOI: 10.23968/1999-5571-2025-22-5-59-66. – EDN: LMFTEQ.
5. Виленский, П. Л. Оценка эффективности инвестиционных проектов: теория и практика / П. Л. Виленский, В. Н. Лившиц, С. А. Смоляк. – М. : Дело, 2008. – 1104 с.
6. Виноградов, С. С. Экологически безопасное гальваническое производство / С. С. Виноградов ; под ред. В. Н. Кудрявцева. – М. : Глобус, 1998. – 302 с.
7. Волошин, А. П. Исследование процесса сгущения тонкодисперсных осадков, образующихся при очистке оборотных вод обогатительных фабрик марганцевых руд : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / Волошин А. П. – Киев, 1974. – 180 с.
8. Вольфтруб, Л. И. Исследование работы тонкослойных осветлителей с контактными камерами хлопьеобразования / Л. И. Вольфтруб, Г. Д. Павлов, Н. С. Лебедева // Процессы и сооружения для разделения взвесей при очистке природных и сточных вод : материалы семинара. – М., 1980. – С. 32–38.

9. Вольфтруб, Л. И. Тонкослойные блоки из мягких полимерных пленок для интенсификации работы отстойников и осветлителей водоочистных станций / Л. И. Вольфтруб // Труды ВНИИ ВОДГЕО. – 1978. – Вып. 75. – С. 48–58.
10. Воронов, Ю. В. Водоотведение и очистка сточных вод : учебник для вузов / Ю. В. Воронов, С. В. Яковлев. – М. : Изд-во АСВ, 2006. – 704 с.
11. Гидравлические исследования работы горизонтальных и радиальных отстойников целлюлозно-бумажной промышленности : отчет о НИР / М. А. Михалев, Т. Д. Кумина. – Л. : ЛПИ, 1972. – 49 с. – Инв. № 8043.
12. Григорьев, М. Ю. Применение балансирующе-нормативного метода определения стоимости строительства на примере отраслевых нормативов / М. Ю. Григорьев // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2018. – Т. 8, № 3А. – С. 291–299.
13. Деев, В. М. Совершенствование конструкций и интенсификация работы сооружений механической очистки сточных вод : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Деев В. М. ; МИСИ. – М., 1991. – 19 с.
14. Денисов, А. А. Исследование эффективности работы горизонтальных отстойников при очистке нефтесодержащих сточных вод : дис. ... канд. техн. наук : 05.15.07 / Денисов А. А. – М., 1979. – 356 с.
15. Журавлев, П. А. Формирование стоимости капитального ремонта на этапе планирования инвестиций / П. А. Журавлев [и др.] // Строительство и техногенная безопасность. – 2021. – № 22 (74). – С. 7–13.
16. Журба, М. Г. Водоочистные фильтры с плавающим фильтрующим слоем : автореф. дис. д-ра техн. наук / Журба М. Г. ; Госстрой СССР, ВНИИ ВОДГЕО. – М., 1986. – 37 с.
17. Иванов, В. Г. Расчет и проектирование тонкослойных отстойников для очистки сточных вод : метод. указания / В. Г. Иванов, Ю. М. Симонов. – Л. : ЛИИЖТ, 1985. – 36 с.
18. Иванов, В. Г. Результаты исследования эффективности применения многоярусных отстойников / В. Г. Иванов, Ю. М. Симонов, В. А. Радциг // Новые исследования сетей и сооружений водоснабжения и канализации : межвуз. темат. сб.

науч. тр. / ЛИСИ. – 1976. – № 4. – С. 73–81.

19. Иванов, В. Г. Электрофоретическая очистка воды в тонком слое / В. Г. Иванов, Н. А. Черников ; ЛИИЖТ. – Л., 1980. – 9 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 25.12.80, № 1329/80.

20. Иванов, И. Очистка промышленных сточных вод в тонкослойном отстойнике / И. Иванов // Годишник на Университета по архитектура, строителство и геодезия. – София, 1995 (1996). – Т. 38, № 6. – С. 67–73.

21. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М. : Машиностроение, 1992. – 672 с.

22. Карманов, А. Технология очистки сточных вод / А. Карманов, И. Полина. – М. : Litres, 2018.

23. Кобозев, И. С. Применение тонкослойных модулей для интенсификации работы действующих очистных водопроводных станций / И. С. Кобозев // Повышение качества питьевой воды / МД НТП. – М., 1977. – С. 49–54.

24. Колинко, В. М. Разработка, создание метода расчета и внедрение тонкослойных отстойников новых конструкций для разделения суспензий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Колинко В. М. – М., 1993. – 16 с.

25. Корабельников, В. М. Исследование и разработка оптимальных технологических процессов осветления воды для малых водоочистных установок : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / Корабельников В. М. ; Акад. коммун. хоз-ва им. К. Д. Памфилова. – М., 1973. – 25 с.

26. Коровин, Л. К. Аэробная биологическая очистка сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности : дис. ... д-ра биол. наук : 11.00.11 / Коровин Л. К. – М., 2000. – 69 с.

27. Лаптев, А. Г. Гидромеханические процессы в технологии водоочистки. Часть II. Конструкции и расчет аппаратов : учеб. пособие / А. Г. Лаптев, Е. О. Шинкевич. – 2014.

28. Медников, Е. М. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей / Е. М. Медников. – М. : Наука, 1981. – 176 с.

29. Михайлов, Л. А. Очистка и обезвреживание производственных сточных вод : текст лекций / Л. А. Михайлов, Н. В. Учеваткина. – М. : МГИУ, 2006. – 21 с. – ISBN 5-276-00821-3.

30. Налесная, Я. А. Проблемы и социально-экономическая значимость сферы услуг (на примере водопроводно-канализационного хозяйства) [Электронный ресурс] / Я. А. Налесная, С. В. Сташ // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 8. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-i-sotsialno-ekonomicheskaya-znachimost-sfery-uslug-na-primere-vodoprovodno-kanalizatsionnogo-hozyaystva> (дата обращения: 26.02.2026).

31. Отстойник ОВ 25 м3 для очистки воды [Электронный ресурс] // Пульс цен. – URL: [https://ekb.pulscen.ru/products/otstoynik\\_ov\\_25\\_m3\\_dlya\\_ochistki\\_vody\\_303219630](https://ekb.pulscen.ru/products/otstoynik_ov_25_m3_dlya_ochistki_vody_303219630) (дата обращения: 09.03.2026).

32. Очистка сточных вод нефтеперерабатывающих заводов / Я. А. Карелин, И. А. Попова, Л. А. Евсеева, О. Я. Евсеева. – М. : Стройиздат, 1982. – 184 с.

33. Очистка сточных вод предприятий мясной и молочной промышленности / С. М. Шифрин, Г. В. Иванов, Б. Г. Мишуков, Ю. А. Феофанов. – М. : Легкая и пищевая пром-сть, 1981. – 272 с.

34. Постановление Правительства РФ от 01.01.2002 № 1 «О Классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы» [Электронный ресурс]. – URL: <https://base.garant.ru/12125271/> (дата обращения: 09.03.2026).

35. Различия в тонкослойных модулях [Электронный ресурс]. – URL: [https://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz=MzA4NzcхOTEwMA==&mid=2651616511&idx=1&sn=7529fdc7c651e2203d4624430bafе91e&chksm=8aaaf3e4b9f697ecea5713504ce420361e2c9f393ed9d4ca8c827c2c69115593742f5f0060ae&scene=27](https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzA4NzcхOTEwMA==&mid=2651616511&idx=1&sn=7529fdc7c651e2203d4624430bafе91e&chksm=8aaaf3e4b9f697ecea5713504ce420361e2c9f393ed9d4ca8c827c2c69115593742f5f0060ae&scene=27) (дата обращения: 09.03.2026).

36. Расчет и проектирование тонкослойных отстойников для очистки природных вод : метод. указания к курсовому и дипломному проектированию для студентов специальности 290800 «Водоснабжение и водоотведение» / сост. О. В.

Чурбакова, Т. И. Халтурина. – Красноярск : КрасГАСА, 2000. – 29 с.

37. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты [Электронный ресурс]. – URL: <https://akstok.com/wp-content/uploads/2019/08/Rekomendatsii-NII-VODGEO-po-raschyotu-sistem-ochistki-livnevyh-stokov.pdf> (дата обращения: 09.03.2026).

38. Совершенствование конструкций и методы расчета тонкослойных отстойников сточных вод / В. Г. Иванов, Г. Н. Кучин, Ю. М. Симонов [и др.]. – М. : ВНИПИЭИлеспром, 1979. – 46 с. – (Обзор. информ. / Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов в лесной, целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности).

39. СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84\* [Электронный ресурс]. – М. : Минрегион России, 2012.

40. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.03-85 : утв. Минстроем России 25.12.2018 : введ. в действие 26.06.2019. – М. : Стандартиформ, 2019.

41. Справочник по очистке природных и сточных вод / Л. Л. Пааль, Я. Я. Кару, Х. А. Пельдер, Б. Н. Репин. – М. : Высшая школа, 1994. – 336 с.

42. Статистика зарплат в Санкт-Петербурге за 2026 год — «Инженер по водоснабжению, канализации» [Электронный ресурс]. – URL: <https://sankt-peterburg.gorodrabot.ru/salaries/inzhener-po-vodosnabzheniyu-kanalizacii> (дата обращения: 09.03.2026).

43. Установка осаждения с наклонной пластиной и отстойник : патент CN105617725A Китай [Электронный ресурс]. – URL: <https://patents.google.com/patent/CN105617725A/zh> (дата обращения: 09.03.2026).

44. Федорова, Э. К. Очистка сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности [Электронный ресурс] / Э. К. Федорова, Н. Г. Бильченко // Вестник магистратуры. – 2014. – № 12-1 (39). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ochistka>

stochnyh-vod-tsellyulozno-bumazhnoy-promyshlennosti (дата обращения: 25.02.2026).

45. **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.

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

47. **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.

48. **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.

49. **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.

50. **Юй, Шуайсянь.** Исследование эффективности очистки тонкослойных модулей различной конструкции / Юй 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.

51. **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.

52. **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.

53. Abilov R. S. O. Research and improvement of the design of a sedimentation tank for hydropower and irrigation // *Machinery & Energetics*. – 2024. – Vol. 15, № 3.

54. Adamczyk W. P. et al. Comparison of the standard Euler–Euler and hybrid Euler–Lagrange approaches for modeling particle transport in a pilot-scale circulating fluidized bed // *Particuology*. – 2014. – Vol. 15. – С. 129–137.

55. Akramov A., Juraev S., Xoshimov S., Axatov D., Pathidinova U. Optimum placement of thin-layer elements in a horizontal sedimentation tank purification of drinking water // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2022. – Vol. 1112, № 1. – С. 012139. – DOI: 10.1088/1755-1315/1112/1/012139.

56. AL-DULAIMI S., Racoviteanu G. Performance of the tube settler clarification at different inclination angles and variable flow rate // *Mathematical Modeling in Civil Engineering*. – 2018. – Vol. 14, № 2.

57. Bagchi P., Balachandar S. Effect of turbulence on the drag and lift of a particle // *Physics of Fluids*. – 2003. – Vol. 15, № 11. – С. 3496–3513.

58. Balasubramanian A. Overview of mineral processing methods. – University of Mysore : Centre for Advanced Studies in Earth Science, 2015.

59. Banaś M., Hilger B. Proposal for New Method for Calculating Sedimentation Process Efficiency in Water Treatment Plants // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, № 13. – С. 3285.

60. Benn F. A. et al. Sedimentation and consolidation of different density aggregates formed by polymer-bridging flocculation // *Chemical Engineering Science*. – 2018. – Vol. 184. – С. 111–125.

61. Bhorkar M. P., Nagarnaik P. B. Improvement in sedimentation by installation of conventional and modified tube settlers: a review // *Possible Schematic Representation of the Operational Processes of a Laboratory*. – 2021.

62. Bleything M. D. Operational Performance of Sedimentation Basins. – 2012.

63. Block R. B. On the resistance to the uniform motion of a solid through a viscous

liquid // Journal of Applied Physics. – 1940. – Vol. 11, № 10. – С. 635–642. – DOI: 10.1063/1.1712715.

64. Bouisfi F. et al. The effect of inlet and outlet position and sediments concentration on sedimentation tank efficiency // 2018 4th International Conference on Optimization and Applications (ICOA). – IEEE, 2018. – С. 1–4.

65. Bratby J. Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment. – 2nd ed. – IWA Publishing, 2006. – ISBN 978-1-78040-232-1. – DOI: 10.2166/9781780402321.

66. Bratby J. Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment. – 3rd ed. – IWA Publishing, 2016. – ISBN 978-1-78040-750-0. – DOI: 10.2166/9781780407500.

67. Bwapwa J. K., Mkhize N., Seyam M. Evaluation of operational efficiency and performance for a water treatment plant // South African Journal of Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 49, № 1. – С. 11–34.

68. Chen G. et al. Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design. – IWA Publishing, 2023. – ISBN 978-1-78906-036-2. – DOI: 10.2166/9781789060362.

69. Cho J. R., Chung M. K. A  $k$ - $\varepsilon$ - $\gamma$  equation turbulence model // Journal of Fluid Mechanics. – 1992. – Vol. 237. – С. 301–322.

70. Compression Settling in Wastewater: Fundamental Principles and Management Strategies [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.waterandwastewater.com/compression-settling-in-wastewater-fundamental-principles-and-management-strategies/> (дата обращения: 09.03.2026).

71. Crowe C. T., Schwarzkopf J. D., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase flows with droplets and particles. – 2nd ed. – CRC Press, 2011. – DOI: 10.1201/b11103.

72. Culp G. The birth of tube and plate settlers: concept to reality, 1904-1965 // Journal - American Water Works Association. – 2014. – Vol. 106, № 12. – С. 39–43.

73. Culp G., Hansen S., Richardson G. High-rate sedimentation in water treatment works // Journal - American Water Works Association. – 1968. – Vol. 60, № 6. – С. 681–

698.

74. Dalley S. Water management in Assyria from the ninth to the seventh centuries BC // ARAM Periodical. – 2001. – Vol. 14. – C. 443–460.

75. Danil de Namor A. F. Water purification: from ancient civilization to the XXI Century // Water Supply. – 2007. – Vol. 7, № 1. – C. 33–39. – DOI: <https://doi.org/10.2166/ws.2007.004>.

76. Dao N. T. et al. Computational fluid dynamics study on attainable flow rate in a lamella settler by increasing inclined plates // Journal of water and environment technology. – 2019. – Vol. 17, № 2. – C. 76–88.

77. Davis R. H., Acrivos A. Sedimentation of noncolloidal particles at low Reynolds numbers // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1985. – Vol. 17, № 1. – C. 91–118.

78. De A. Sedimentation process and design of settling systems. – Springer India, 2017. – C. 49–52.

79. De Feo G. et al. Water and wastewater management technologies through the centuries // Water Science and Technology: Water Supply. – 2010. – Vol. 10, № 3. – C. 337–349.

80. Different types of sedimentation [Электронный ресурс] // SUEZ Water Handbook. – URL: <https://www.suezwaterhandbook.com/water-and-generalities/fundamental-physical-chemical-engineering-processes-applicable-to-water-treatment/sedimentation/different-types-of-sedimentation> (дата обращения: 09.03.2026).

81. Doroodchi E., Fletcher D., Galvin K. Influence of inclined plates on the expansion behaviour of particulate suspensions in a liquid fluidised bed // Chemical Engineering Science. – 2004. – Vol. 59, № 17. – C. 3559–3567.

82. Droste R. L., Gehr R. L. Theory and practice of water and wastewater treatment. – John Wiley & Sons, 2018.

83. Engelhardt T. L. Coagulation, flocculation and clarification of drinking water // Drinking water sector, Hach Company. – 2010.

84. Enviroquip Rapid Sludge Removal Clarifier [Электронный ресурс] // Ovivo.

– URL: <https://www.ovivowater.com/en/product/enviroquip-rapid-sludge-removal-clarifier/> (дата обращения: 09.03.2026).

85. Evaluation of Primary Sedimentation Tanks Performance By Integrating Mathematical Modeling With Field Testing [Электронный ресурс] // Brown and Caldwell.

– URL: <https://brownandcaldwell.com/papers-and-reports/evaluation-of-primary-sedimentation-tanks-performance-by-integrating-mathematical-modeling-with-field-testing/> (дата обращения: 09.03.2026).

86. Falco S. et al. Solids removal efficiency of a sedimentation tank in a peri-urban catchment // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, № 17. – С. 7196.

87. Falletti L., Conte L., Zaggia A. Small wastewater treatment plants in Italy: situation and case studies of upgrading with advanced technologies // Desalination and Water Treatment. – 2013. – Vol. 51, № 10–12. – С. 2402–2410.

88. Fleite S. N. et al. Simulation and optimization of a lamella settler for cattle feedlot wastewater treatment and nutrients recovery. Experimental validation in the field // Heliyon. – 2020. – Vol. 6, № 12. – С. e05840. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e05840.

89. Flocculation [Электронный ресурс] // Wikipedia. – URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Flocculation> (дата обращения: 09.03.2026).

90. Galvin K., Walton K., Zhou J. How to elutriate particles according to their density // Chemical Engineering Science. – 2009. – Vol. 64, № 9. – С. 2003–2010.

91. GB 18918-2002. Стандарт выбросов загрязняющих веществ для городских очистных сооружений сточных вод [Электронный ресурс].

92. GB 50014-2021. Стандарт проектирования систем наружного водоотведения [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2021/art\\_17339\\_250183.html](https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2021/art_17339_250183.html) (дата обращения: 09.03.2026).

93. Ghawi A. H. A numerical model of flow and settling in sedimentation tanks in potable water treatment plants. – Bratislava : STU Bratislava, Stavebná fakulta, 2008.

94. Ghawi A. H., Kriš J., Oh H. W. A computational fluid dynamics model of flow and settling in sedimentation tanks // Applied Computational Fluid Dynamics. – 2012. – Vol.

10. – C. 27160.

95. Goula A. M. et al. A CFD methodology for the design of sedimentation tanks in potable water treatment: Case study: The influence of a feed flow control baffle // *Chemical Engineering Journal*. – 2008. – Vol. 140, № 1–3. – C. 110–121.

96. Goula A. M. et al. The effect of influent temperature variations in a sedimentation tank for potable water treatment — a computational fluid dynamics study // *Water Research*. – 2008. – Vol. 42, № 13. – C. 3405–3414. – DOI: 10.1016/j.watres.2008.05.002.

97. Gupta V. K. et al. Chemical treatment technologies for waste-water recycling — an overview // *RSC Advances*. – 2012. – Vol. 2, № 16. – C. 6380–6388.

98. Hadi G. A., Kriš J. A CFD methodology for the design of rectangular sedimentation tanks in potable water treatment plants // *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*. – 2009. – Vol. 58, № 3. – C. 212–220.

99. Hansen S. P., Culp G. I. Applying Shallow Depth Sedimentation Theory // *Journal - American Water Works Association*. – 1967. – Vol. 59, № 9. – C. 1134–1148. – DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1967.tb03501.x>.

100. Hao X. et al. Resource recovery from wastewater: what, why, and where? // *Environmental Science & Technology*. – 2024. – Vol. 58, № 32. – C. 14065–14067.

101. He C., Marsalek J. Vortex plate for enhancing particle settling // *Journal of Environmental Engineering*. – 2009. – Vol. 135, № 8. – C. 627–635.

102. Hirom K., Devi T. T. Application of computational fluid dynamics in sedimentation tank design and its recent developments: A review // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2022. – Vol. 233, № 1. – C. 22.

103. Hlukhov D. et al. An in-depth analysis of the hydrodynamic behaviour of a high-rate lamellar DAF tank by means of CFD simulations // *Applied Water Science*. – 2024. – Vol. 14, № 6. – C. 131.

104. Kalvani N. et al. Evaluation of iron and manganese removal effectiveness by treatment plant modules based on water pollution index; a comprehensive approach // *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 19, № 1. – C.

1005–1013.

105. Kapoor B., Acrivos A. Sedimentation and sediment flow in settling tanks with inclined walls // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1995. – Vol. 290. – C. 39–66.

106. Kasenene A. J., Machunda R. L., Njau K. N. Performance of inclined plates settler integrated with constructed wetland for high turbidity water treatment // *Water Practice & Technology*. – 2021. – Vol. 16, № 2. – C. 516–529.

107. Katz A., Sankaran V. Mesh quality effects on the accuracy of CFD solutions on unstructured meshes // *Journal of Computational Physics*. – 2011. – Vol. 230, № 20. – C. 7670–7686.

108. Kawamura S. Integrated design and operation of water treatment facilities. – 2nd ed. – John Wiley & Sons, 2000. – 720 c. – ISBN 978-0-471-35093-4.

109. Kołodziejczyk K., Banaś M., Warzecha P. Flow modeling in a laboratory settling tank with optional counter-current or cross-current lamella // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2012. – Vol. 53, № 1. – C. 28.

110. Lasaki B. A., Maurer P., Schönberger H. Uncovering the reasons behind high-performing primary sedimentation tanks for municipal wastewater treatment: An in-depth analysis of key factors // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2024. – Vol. 12, № 2. – C. 112460.

111. LeChevallier M. W., Kwok-Keung A. Water treatment and pathogen control: Process efficiency in achieving safe drinking-water. – 2004.

112. Legendre D., Magnaudet J. A note on the lift force on a spherical bubble or drop in a low-Reynolds-number shear flow // *Physics of Fluids*. – 1997. – Vol. 9, № 11. – C. 3572–3574.

113. Leung W. F. Lamella and tube settlers. 2. Flow stability // *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*. – 1983. – Vol. 22, № 1. – C. 68–73.

114. Leung W. F., Probstein R. F. Lamella and tube settlers. 1. Model and operation // *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*. – 1983. – Vol. 22,

№ 1. – C. 58–67.

115. Li B., Stenstrom M. K. Research advances and challenges in one-dimensional modeling of secondary settling tanks—a critical review // *Water Research*. – 2014. – Vol. 65. – C. 40–63.

116. Li Y. et al. A novel particulate sedimentation model in inclined channels of liquid–solid fluidized bed // *Powder Technology*. – 2017. – Vol. 305. – C. 764–770.

117. Li Y. et al. Motion characteristics of binary solids in a liquid fluidised bed with inclined plates // *Particuology*. – 2018. – Vol. 39. – C. 48–54.

118. Li Y. et al. Optimization of settling tank design to remove particles and metals // *Journal of Environmental Engineering*. – 2008. – Vol. 134, № 11. – C. 885–894.

119. Li Y. et al. Summary of experiments and influencing factors of sediment settling velocity in still water // *Water*. – 2024. – Vol. 16, № 7. – C. 938.

120. Liu D. Two-phase fluid dynamics. – Beijing : Higher Education Press, 1993. – 734 c.

121. Liu L., Perez M. A., Whitman J. B. Evaluation of lamella settlers for treating suspended sediment // *Water*. – 2020. – Vol. 12, № 10. – C. 2705.

122. Löffler D. et al. Environmental fate of pharmaceuticals in water/sediment systems // *Environmental Science & Technology*. – 2005. – Vol. 39, № 14. – C. 5209–5218.

123. Lukerchenko N. et al. Drag force, drag torque, and Magnus force coefficients of rotating spherical particle moving in fluid // *Particulate Science and Technology*. – 2012. – Vol. 30, № 1. – C. 55–67.

124. Maqina P., Von Kallon D. V. Design and simulation of a lamella clarifier // 2nd South American Conference on Industrial Engineering and Operations Management, IEOM 2021. – IEOM Society, 2021. – C. 2453–2463.

125. Martínez-González G. et al. Approximate method for designing a primary settling tank for wastewater treatment // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2009. – Vol. 48, № 16. – C. 7842–7846.

126. Mays L. W. A brief history of water filtration/sedimentation // *Water Science and Technology: Water Supply*. – 2013. – Vol. 13, № 3. – C. 735–742.

127. Meng S. et al. Wastewater treatment in mineral processing of non-ferrous metal resources: a review // *Water*. – 2022. – Vol. 14, № 5. – C. 726.
128. Merrouchi F. The influence of obstacles and suspended matter on the distribution of turbulent flow velocities in a lamella separator // *Journal of New Technology and Materials*. – 2017. – Vol. 7, № 1. – C. 53–63.
129. Nagano Y., Tagawa M. An improved k- $\epsilon$  model for boundary layer flows // *Journal of Fluids Engineering*. – 1990. – Vol. 112, № 1. – C. 33–39.
130. Nguyen The Anh. Hydrodynamics of Lamella Clarifiers in Wastewater Treatment Plants. – 2020. – 207 c.
131. Ortiz A. et al. Optimization and operation of a demonstrative full scale microalgae harvesting unit based on coagulation, flocculation and sedimentation // *Separation and Purification Technology*. – 2021. – Vol. 259. – C. 118171.
132. Pan C. et al. Optimization and Performance Evaluation of the Innovative Hive-Like Shape Sedimentation Device for Particle Separation: Improving Efficiency and Modular Implementation // Available at SSRN 5377323. – 2024.
133. Paraskevas P., Kolokithas G., Lekkas T. A complete dynamic model of primary sedimentation // *Environmental Technology*. – 1993. – Vol. 14, № 11. – C. 1037–1046.
134. Pavoni J. L., Spinney P. R. Automation of Wastewater Treatment Systems. – 1972.
135. Pillai S. B., Thombre N. V. Coagulation, flocculation, and precipitation in water and used water purification // *Handbook of water and used water purification*. – Springer, Cham, 2023. – C. 1–25.
136. Qasim S. R. Wastewater treatment plants: planning, design, and operation. – Routledge, 2017.
137. Rak J. R., Kucharski B. Sludge management in water treatment plants // *Environment Protection Engineering*. – 2009. – Vol. 35, № 2. – C. 15.
138. Ramkisson H., O'Neill M. E. Stokes force in microcontinuum fluid mechanics // *Acta Mechanica*. – 1983. – Vol. 46, № 1–4. – C. 255–263.
139. Rebhun M., Argaman Y. Evaluation of hydraulic efficiency of sedimentation

basins // Journal of the Sanitary Engineering Division. – 1965. – Vol. 91, № 5. – С. 37–48.

140. Reyes C. et al. A review on steeply inclined settlers for water clarification // Minerals Engineering. – 2022. – Vol. 184. – С. 107639. – DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107639.

141. Reyes C., Arratia C., Ihle C. F. The destabilizing effect of particle concentration in inclined settlers // Physics of Fluids. – 2025. – Vol. 37, № 3.

142. Salah AL-kizwini R. Improvement of sedimentation process using inclined plates // Mesopotamia Environ J. – 2015. – Vol. 2. – С. 100–114.

143. Saleh A. M., Hamoda M. F. Upgrading of secondary clarifiers by inclined plate settlers // Water science and technology. – 1999. – Vol. 40, № 7. – С. 141–149.

144. Salem A. I. On fluid dynamics of lamella separator modelling and process optimisation : дис. – Universität Bremen, 2012.

145. Salem A. I., Okoth G., Thöming J. An approach to improve the separation of solid–liquid suspensions in inclined plate settlers: CFD simulation and experimental validation // Water research. – 2011. – Vol. 45, № 11. – С. 3541–3549.

146. Sangamnere R. et al. A critical review of conventional and emerging wastewater treatment technologies // Sustainable Water Resources Management. – 2023. – Vol. 9, № 2. – С. 58.

147. Sarkar S., Kamilya D., Mal B. C. Effect of geometric and process variables on the performance of inclined plate settlers in treating aquacultural waste // Water Research. – 2007. – Vol. 41, № 5. – С. 993–1000.

148. Schaflinger U. Experiments on sedimentation beneath downward-facing inclined walls // International Journal of Multiphase Flow. – 1985. – Vol. 11, № 2. – С. 189–199.

149. Screening and sedimentation [Электронный ресурс]. – URL: [https://web.cecs.pdx.edu/~fishw/UO\\_11.2-Sedimentation.pdf](https://web.cecs.pdx.edu/~fishw/UO_11.2-Sedimentation.pdf) (дата обращения: 09.03.2026).

150. Sedimentation in Wastewater Treatment: Core Principles [Электронный ресурс] // Porvoo. – URL: <https://porvoo.com.cn/blog/sedimentation-in-wastewater->

treatment-core-principles/ (дата обращения: 09.03.2026).

151. Shahrokhi M. et al. The effect of number of baffles on the improvement efficiency of primary sedimentation tanks // *Applied Mathematical Modelling*. – 2012. – Vol. 36, № 8. – С. 3725–3735.

152. Shammas N. K. et al. *Sedimentation // Physicochemical Treatment Processes*. – Totowa, NJ : Humana Press, 2005. – С. 379–429.

153. Shearer S. A., Hudson J. R. *Fluid mechanics: stokes' law and viscosity // Measurement Laboratory*. – 2008. – Vol. 3. – С. 1–7.

154. Smith B. T. et al. Enhanced sediment flow in inclined settlers via surface modification or applied vibration for harvesting microalgae // *Algal Research*. – 2013. – Vol. 2, № 4. – С. 369–377.

155. Song H. *Engineering fluid mechanics*. – Singapore : Springer, 2018.

156. Stabel H. H. Settling velocity and residence time of particles in Lake Constance // *Schweiz. Z. Hydrol.* – 1987. – Vol. 49. – С. 284–293. – DOI: 10.1007/BF02538289.

157. Steidel R. et al. Are you inclined to improve settling: cost effective increasing of secondary clarifier capacity with inclined plates // *Water Environment Federation*. – 2004. – № 12. – С. 135–162. – DOI: 10.2175/193864704784138395.

158. Stewart M., Arnold K. *Produced water treatment field manual*. – Gulf Professional Publishing, 2011.

159. Sun Z. et al. Numerical prediction of particle slip velocity in turbulence by CFD-DEM simulation // *Particuology*. – 2023. – Vol. 80. – С. 170–179. – DOI: 10.1016/j.partic.2022.11.021.

160. Swamee P. K., Tyagi A. Design of class-I sedimentation tanks // *Journal of Environmental Engineering*. – 1996. – Vol. 122, № 1. – С. 71–73.

161. Tambo N., Ogasawara K. Particles and particle separation basics // *Phys. Chem. Sep. Water Wastew. Treat.* – 2020.

162. Tarpagkou R., Pantokratoras A. CFD methodology for sedimentation tanks: The effect of secondary phase on fluid phase using DPM coupled calculations // *Applied Mathematical Modelling*. – 2013. – Vol. 37, № 5. – С. 3478–3494. – DOI:

10.1016/j.ces.2016.09.022.

163. Tarpagkou R., Pantokratoras A. The influence of lamellar settler in sedimentation tanks for potable water treatment — a computational fluid dynamic study // Powder Technology. – 2014. – Vol. 268. – С. 139–149.

164. Tchobanoglous G. et al. Wastewater engineering: treatment and resource recovery / Metcalf & Eddy. – 5th ed. – New York : McGraw-Hill, 2013. – 2048 с. – ISBN 978-0-07-340118-8.

165. Temam R. Navier-Stokes equations: theory and numerical analysis. – American Mathematical Society, 2024. – Vol. 343.

166. The ideal sedimentation basin [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5\\_2025\\_03\\_26%2112\\_41\\_11\\_AM.pdf](https://www.uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5_2025_03_26%2112_41_11_AM.pdf) (дата обращения: 09.03.2026).

167. Townsend D. W. Design of final settling tanks for activated sludge: a discussion // Sewage Works Journal. – 1945. – Vol. 17, № 4. – С. 803–808. – URL: [suspicious link removed] (дата обращения: 09.03.2026).

168. Turlej T. Modern Sedimentation Techniques // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. – 2018. – Vol. 18, № 5.1. – С. 549–556.

169. Vahidifar S., Saffarian M. R., Hajidavalloo E. Introducing the theory of successful settling in order to evaluate and optimize the sedimentation tanks // Meccanica. – 2018. – Vol. 53, № 14. – С. 3477–3493.

170. Valta K. et al. Overview of water usage and wastewater management in the food and beverage industry // Desalination and Water Treatment. – 2015. – Vol. 53, № 12. – С. 3335–3347. – DOI: 10.1080/19443994.2014.934100.

171. Vanoni V. A. Sedimentation engineering. – American Society of Civil Engineers, 2006.

172. Vasconcelos J. G. et al. Lamella settlers: Sediment removal from roadway construction runoff. – 2014.

173. Wang K. et al. A case study on settling process in inclined-tube gravity sedimentation tank for drip irrigation with the yellow river water // Water. – 2020. – Vol. 12,

№ 6. – С. 1685.

174. Wang Y. et al. CFD-DEM coupling model for deposition process analysis of ultrafine particles in a micro impinging flow field // *Micromachines*. – 2022. – Vol. 13, № 7. – С. 1110.

175. Water treatment. Sedimentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Sedimentation-1.pdf> (дата обращения: 09.03.2026).

176. Wright K. R., Kelly J. M., Valencia Zegarra A. Machu Picchu: ancient hydraulic engineering // *Journal of Hydraulic Engineering*. – 1997. – Vol. 123, № 10. – С. 838–843.

177. Wu L., Yao W., Ma X. Using the comprehensive governance degree to calibrate a piecewise sediment delivery ratio algorithm for dynamic sediment predictions: A case study in an ecological restoration watershed of northwest China // *Journal of Hydrology*. – 2018. – Vol. 564. – С. 888–899.

178. Yao K. M. Theoretical study of high-rate sedimentation // *Journal of Water Pollution Control Federation*. – 1970. – Vol. 42, № 2 (Part 1). – С. 218–228. – URL: [suspicious link removed].

179. Ye Z. et al. Three-Dimensional numerical analysis and operational optimization of high-efficiency sedimentation tank // *Water*. – 2023. – Vol. 15, № 20. – С. 3656.

180. **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.

181. Zăbavă B. Ș. et al. Considerations on the equipment used for wastewater settling-a review. – 2016.

182. Zahavi E., Rubin E. Settling of solid suspensions under and between inclined surfaces // *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*. – 1975. – Vol. 14, № 1. – С. 34–41.

183. Zaman H. U. A framework for improving the productivity of operational

preventive maintenance activities for wastewater collection system. – 2016.

184. Zamanikherad M. et al. An efficient design of primary sedimentation tanks using a combination of the response surface, metaheuristic, and scenario building methods // *International Journal of Environmental Science and Technology*. – 2023. – Vol. 20, № 2. – C. 1215–1246.

185. Zha Y. et al. Effect of inclined-tube on the removal performance of fine sediment in a gravity sedimentation tank // *Irrigation and Drainage*. – 2026. – Vol. 75, № 1. – C. 159–172.

186. Zhang D. et al. A method for characterizing the complete settling process of activated sludge // *Water Research*. – 2006. – Vol. 40, № 14. – C. 2637–2644.

187. Zhang H. et al. Optimizing the inclined plate settler for a high-rate microaerobic activated sludge process for domestic wastewater treatment: A theoretical model and experimental validation // *International Biodeterioration & Biodegradation*. – 2020. – Vol. 154. – C. 105060.

188. Zhang J. et al. Current operation state of wastewater treatment plants in urban China // *Environmental Research*. – 2021. – Vol. 195. – C. 110843. – DOI: 10.1016/j.envres.2021.110843.

189. Zhang J., Zhang L., Liu L. Research and development of horizontal tube sedimentation separation device // *China Water & Wastewater*. – 2008. – № 9. – C. 47–51.

190. Zhang X. et al. Analysis of settling efficiency and structural optimization of settling tank // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2025.

191. Zhang Z., Lin R., Jin R. Wastewater engineering (Vol. 2). – 5th ed. – Beijing : China Architecture & Building Press, 2015. – 775 c.

192. Zhao J. Three-dimensional numerical simulation of inclined tube sedimentation tank with countercurrent flow // *Engineering and Construction*. – 2015. – Vol. 29, № 2. – C. 158–160.

193. Zhou S., McCorquodale J. A. Modeling of rectangular settling tanks // *Journal of Hydraulic Engineering*. – 1992. – Vol. 118, № 10. – C. 1391–1405.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Оборудование лабораторной установки



### Паспорт насоса

|                                 |                                   |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| Модель                          | Oasis насос циркуляционный C-25/4 |
| Режим работы                    | Продолжительный                   |
| Температура жидкости            | От 10°C до +110°C                 |
| Температура окружающей среды    | До 40°C                           |
| Максимальное рабочее давление   | 10 бар                            |
| Максимальная производительность | От 20 до 40 л/мин                 |
| Максимальный напор              | 2-4 м                             |
| Максимальная мощность           | 35-72 Вт                          |
| Материал двигателя              | Медь                              |
| Материал станины                | Чугун                             |
| Материал корпуса двигателя      | Алюминий                          |
| Крыльчатка                      | GF-PP                             |
| Подшипники                      | Керамика                          |
| Вал                             | Керамика                          |
| Класс защиты                    | IP44                              |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Данные экспериментов с новым тонкослойным модулем:

| $u_{жс} = 0,005$ м/с               |                |                             |                          |                               |                              |
|------------------------------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Количество входящих частиц         | Диаметр частиц | Количество убегающих частиц | Среднее время пребывания | Максимальное время пребывания | Минимальное время пребывания |
| 3000                               | 50–75          | 688                         | 578,663                  | 1184,2                        | 292,97                       |
| 3000                               | 75–100         | 244                         | 557,3071                 | 1111,9                        | 344,44                       |
| 3000                               | 100–125        | 28                          | 576,9254                 | 747,51                        | 411,81                       |
| 3000                               | 125–150        | 2                           | 549,14                   | 595,07                        | 503,21                       |
| 3000                               | 150–175        | 0                           | 0                        | 0                             | 0                            |
| 3000                               | 175–200        | 0                           | 0                        | 0                             | 0                            |
| 3000                               | 200–225        | 0                           | 0                        | 0                             | 0                            |
| 3000                               | 225–250        | 0                           | 0                        | 0                             | 0                            |
| 3000                               | 250–275        | 0                           | 0                        | 0                             | 0                            |
| 3000                               | 275–300        | 0                           | 0                        | 0                             | 0                            |
| Общее количество убегающих частиц  | -              | 962                         | -                        | -                             | -                            |
| Общее количество осажденных частиц | -              | 24778                       | -                        | -                             | -                            |

| $u_{жс} = 0,01$ м/с                |                |                             |                          |                               |                              |
|------------------------------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Количество входящих частиц         | Диаметр частиц | Количество убегающих частиц | Среднее время пребывания | Максимальное время пребывания | Минимальное время пребывания |
| 3000                               | 50–75          | 1757                        | 322,5953                 | 1129                          | 143,16                       |
| 3000                               | 75–100         | 1402                        | 333,9221                 | 860,93                        | 158,67                       |
| 3000                               | 100–125        | 895                         | 335,0829                 | 1086,5                        | 194,86                       |
| 3000                               | 125–150        | 438                         | 327,4432                 | 943,6                         | 203,67                       |
| 3000                               | 150–175        | 154                         | 314,1528                 | 525,66                        | 223,39                       |
| 3000                               | 175–200        | 42                          | 300,6076                 | 414,76                        | 228,16                       |
| 3000                               | 200–225        | 11                          | 300,1409                 | 424,73                        | 251,34                       |
| 3000                               | 225–250        | 3                           | 307,04                   | 320,81                        | 284,8                        |
| 3000                               | 250–275        | 2                           | 278,98                   | 288,28                        | 269,68                       |
| 3000                               | 275–300        | 0                           | 0                        | 0                             | 0                            |
| Общее количество убегающих частиц  | -              | 4704                        | -                        | -                             | -                            |
| Общее количество осажденных частиц | -              | 21036                       | -                        | -                             | -                            |

| $u_{жс} = 0,015 \text{ м/с}$       |                |                             |                          |                               |                              |
|------------------------------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Количество входящих частиц         | Диаметр частиц | Количество убегающих частиц | Среднее время пребывания | Максимальное время пребывания | Минимальное время пребывания |
| 3000                               | 50–75          | 2038                        | 232,3553                 | 793,46                        | 112,32                       |
| 3000                               | 75–100         | 1760                        | 237,2281                 | 696,28                        | 117,41                       |
| 3000                               | 100–125        | 1421                        | 239,7275                 | 554,25                        | 115,69                       |
| 3000                               | 125–150        | 985                         | 244,133                  | 775,74                        | 118,93                       |
| 3000                               | 150–175        | 531                         | 237,6143                 | 501,98                        | 154,65                       |
| 3000                               | 175–200        | 231                         | 228,6213                 | 432,88                        | 153,95                       |
| 3000                               | 200–225        | 92                          | 232,7153                 | 365,77                        | 170,47                       |
| 3000                               | 225–250        | 33                          | 219,58                   | 308,77                        | 171,68                       |
| 3000                               | 250–275        | 15                          | 220,8833                 | 329,35                        | 164,46                       |
| 3000                               | 275–300        | 4                           | 261,3775                 | 348,77                        | 198,94                       |
| Общее количество убегающих частиц  | -              | 7110                        | -                        | -                             | -                            |
| Общее количество осажденных частиц | -              | 18630                       | -                        | -                             | -                            |

| $u_{жс} = 0,02 \text{ м/с}$        |                |                             |                          |                               |                              |
|------------------------------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Количество входящих частиц         | Диаметр частиц | Количество убегающих частиц | Среднее время пребывания | Максимальное время пребывания | Минимальное время пребывания |
| 3000                               | 50–75          | 2147                        | 191,7638                 | 692,58                        | 96,367                       |
| 3000                               | 75–100         | 1934                        | 191,981                  | 556,81                        | 99,165                       |
| 3000                               | 100–125        | 1760                        | 195,4054                 | 644,01                        | 96,287                       |
| 3000                               | 125–150        | 1336                        | 197,8869                 | 472,59                        | 96,544                       |
| 3000                               | 150–175        | 960                         | 191,5191                 | 407,2                         | 102,45                       |
| 3000                               | 175–200        | 589                         | 189,2097                 | 507,94                        | 105,04                       |
| 3000                               | 200–225        | 319                         | 182,675                  | 304,72                        | 114,07                       |
| 3000                               | 225–250        | 156                         | 178,4141                 | 337,28                        | 137,28                       |
| 3000                               | 250–275        | 76                          | 176,6886                 | 282,43                        | 140,84                       |
| 3000                               | 275–300        | 34                          | 170,1159                 | 266,55                        | 141,33                       |
| Общее количество убегающих частиц  | -              | 9311                        | -                        | -                             | -                            |
| Общее количество осажденных частиц | -              | 16429                       | -                        | -                             | -                            |

| $u_{жс} = 0,025 \text{ м/с}$ |                |                             |                          |                               |                              |
|------------------------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Количество входящих частиц   | Диаметр частиц | Количество убегающих частиц | Среднее время пребывания | Максимальное время пребывания | Минимальное время пребывания |
| 3000                         | 50–75          | 2214                        | 167,461                  | 864,28                        | 83,389                       |
| 3000                         | 75–100         | 2051                        | 164,8417                 | 483,8                         | 85,627                       |
| 3000                         | 100–125        | 1830                        | 163,8113                 | 360,94                        | 83,798                       |

|                                       |         |       |          |        |        |
|---------------------------------------|---------|-------|----------|--------|--------|
| 3000                                  | 125–150 | 1605  | 167,5414 | 415,57 | 85,044 |
| 3000                                  | 150–175 | 1231  | 166,329  | 369,15 | 87,952 |
| 3000                                  | 175–200 | 885   | 167,8245 | 418,95 | 88,596 |
| 3000                                  | 200–225 | 580   | 162,6328 | 321,4  | 90,749 |
| 3000                                  | 225–250 | 377   | 162,345  | 268,2  | 96,22  |
| 3000                                  | 250–275 | 200   | 161,6573 | 689,42 | 97,633 |
| 3000                                  | 275–300 | 103   | 154,6536 | 273,6  | 94,744 |
| Общее количество<br>убегающих частиц  | -       | 11076 | -        | -      | -      |
| Общее количество<br>осажденных частиц | -       | 14664 | -        | -      | -      |

| $u_{ж} = 0,03$ м/с                    |                   |                                   |                             |                                  |                                    |
|---------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Количество<br>входящих частиц         | Диаметр<br>частиц | Количество<br>убегающих<br>частиц | Среднее время<br>пребывания | Максимальное<br>время пребывания | Минимальное<br>время<br>пребывания |
| 3000                                  | 50–75             | 2235                              | 151,2673                    | 1198,7                           | 77,311                             |
| 3000                                  | 75–100            | 2086                              | 143,9151                    | 478,52                           | 78,154                             |
| 3000                                  | 100–125           | 1959                              | 144,4158                    | 351,05                           | 76,828                             |
| 3000                                  | 125–150           | 1777                              | 147,6866                    | 326,19                           | 78,968                             |
| 3000                                  | 150–175           | 1446                              | 149,6082                    | 357,96                           | 79,442                             |
| 3000                                  | 175–200           | 1068                              | 147,4267                    | 318,69                           | 79,768                             |
| 3000                                  | 200–225           | 794                               | 149,982                     | 369,31                           | 81,617                             |
| 3000                                  | 225–250           | 526                               | 152,6691                    | 725,84                           | 81,692                             |
| 3000                                  | 250–275           | 323                               | 147,7715                    | 339,89                           | 83,563                             |
| 3000                                  | 275–300           | 207                               | 150,2209                    | 656,44                           | 80,633                             |
| Общее количество<br>убегающих частиц  | -                 | 12421                             | -                           | -                                | -                                  |
| Общее количество<br>осажденных частиц | -                 | 13319                             | -                           | -                                | -                                  |

Данные экспериментов с классическим тонкослойным модулем:

| $u_{ж} = 0,005$ м/с           |                   |                                   |                             |                                  |                                    |
|-------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Количество<br>входящих частиц | Диаметр<br>частиц | Количество<br>убегающих<br>частиц | Среднее время<br>пребывания | Максимальное<br>время пребывания | Минимальное<br>время<br>пребывания |
| 3000                          | 50–75             | 2500                              | 378,2192                    | 1176                             | 187,46                             |
| 3000                          | 75–100            | 2500                              | 430,5487                    | 1198                             | 195,4                              |
| 3000                          | 100–125           | 2500                              | 490,4804                    | 1197,8                           | 231,99                             |
| 3000                          | 125–150           | 2500                              | 556,1215                    | 1199,5                           | 241,84                             |
| 3000                          | 150–175           | 2500                              | 599,4501                    | 1199,9                           | 246,32                             |
| 3000                          | 175–200           | 2122                              | 613,146                     | 1199,6                           | 250,48                             |
| 3000                          | 200–225           | 855                               | 613,8681                    | 1198,3                           | 283,26                             |
| 3000                          | 225–250           | 262                               | 568,1319                    | 1143,2                           | 289,05                             |

|                                       |         |       |          |        |        |
|---------------------------------------|---------|-------|----------|--------|--------|
| 3000                                  | 250–275 | 45    | 534,4809 | 1145,6 | 309,46 |
| 3000                                  | 275–300 | 2     | 669,345  | 692,95 | 645,74 |
| Общее количество<br>убегающих частиц  | -       | 15786 | -        | -      | -      |
| Общее количество<br>осажденных частиц | -       | 14214 | -        | -      | -      |

| $u_{жс} = 0,01$ м/с                   |                   |                                   |                             |                                  |                                    |
|---------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Количество<br>входящих частиц         | Диаметр<br>частиц | Количество<br>убегающих<br>частиц | Среднее время<br>пребывания | Максимальное<br>время пребывания | Минимальное<br>время<br>пребывания |
| 3000                                  | 50–75             | 2500                              | 201,7876                    | 765,05                           | 117,64                             |
| 3000                                  | 75–100            | 2404                              | 214,2078                    | 772,75                           | 118,96                             |
| 3000                                  | 100–125           | 2384                              | 232,3641                    | 1057,3                           | 122,03                             |
| 3000                                  | 125–150           | 2345                              | 254,6671                    | 1100,8                           | 122,89                             |
| 3000                                  | 150–175           | 2312                              | 288,4524                    | 1188,3                           | 129,39                             |
| 3000                                  | 175–200           | 2125                              | 330,986                     | 1194,1                           | 130,86                             |
| 3000                                  | 200–225           | 2100                              | 379,3361                    | 1199,2                           | 146,66                             |
| 3000                                  | 225–250           | 1650                              | 406,1306                    | 1198,2                           | 149,61                             |
| 3000                                  | 250–275           | 1165                              | 407,5087                    | 1199,1                           | 157,87                             |
| 3000                                  | 275–300           | 500                               | 397,104                     | 1199,1                           | 159,53                             |
| Общее количество<br>убегающих частиц  | -                 | 19485                             | -                           | -                                | -                                  |
| Общее количество<br>осажденных частиц | -                 | 10515                             | -                           | -                                | -                                  |

| $u_{жс} = 0,015$ м/с                  |                   |                                   |                             |                                  |                                    |
|---------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Количество<br>входящих частиц         | Диаметр<br>частиц | Количество<br>убегающих<br>частиц | Среднее время<br>пребывания | Максимальное<br>время пребывания | Минимальное<br>время<br>пребывания |
| 3000                                  | 50–75             | 2496                              | 153,331                     | 606,23                           | 93,266                             |
| 3000                                  | 75–100            | 2499                              | 159,2312                    | 1114,8                           | 95,807                             |
| 3000                                  | 100–125           | 2494                              | 167,5479                    | 1039,9                           | 97,383                             |
| 3000                                  | 125–150           | 2495                              | 178,646                     | 662,18                           | 96,535                             |
| 3000                                  | 150–175           | 2495                              | 194,8544                    | 1044,3                           | 97,556                             |
| 3000                                  | 175–200           | 2483                              | 213,7039                    | 1177,4                           | 98,281                             |
| 3000                                  | 200–225           | 2402                              | 240,7609                    | 1196,6                           | 105,88                             |
| 3000                                  | 225–250           | 2091                              | 270,9234                    | 1198,1                           | 121,12                             |
| 3000                                  | 250–275           | 1170                              | 290,503                     | 1196,8                           | 118,24                             |
| 3000                                  | 275–300           | 900                               | 290,4276                    | 1195,6                           | 128,86                             |
| Общее количество<br>убегающих частиц  | -                 | 21525                             | -                           | -                                | -                                  |
| Общее количество<br>осажденных частиц | -                 | 8475                              | -                           | -                                | -                                  |

| $u_{жс} = 0,02$ м/с                |                |                             |                          |                               |                              |
|------------------------------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Количество входящих частиц         | Диаметр частиц | Количество убегающих частиц | Среднее время пребывания | Максимальное время пребывания | Минимальное время пребывания |
| 3000                               | 50–75          | 2500                        | 128,3445                 | 402,41                        | 82,479                       |
| 3000                               | 75–100         | 2500                        | 131,8512                 | 455,76                        | 83,947                       |
| 3000                               | 100–125        | 2500                        | 137,3793                 | 593,63                        | 85,261                       |
| 3000                               | 125–150        | 2499                        | 144,1333                 | 922,69                        | 83,742                       |
| 3000                               | 150–175        | 2499                        | 153,6316                 | 781,73                        | 83,954                       |
| 3000                               | 175–200        | 2491                        | 166,6349                 | 1100,7                        | 85,121                       |
| 3000                               | 200–225        | 2476                        | 182,5403                 | 1192,6                        | 86,66                        |
| 3000                               | 225–250        | 2356                        | 202,9938                 | 1190,2                        | 89,074                       |
| 3000                               | 250–275        | 1911                        | 224,5091                 | 1196,4                        | 89,879                       |
| 3000                               | 275–300        | 932                         | 232,5933                 | 1199,7                        | 88,552                       |
| Общее количество убегающих частиц  | -              | 22664                       | -                        | -                             | -                            |
| Общее количество осажденных частиц | -              | 7336                        | -                        | -                             | -                            |

| $u_{жс} = 0,025$ м/с               |                |                             |                          |                               |                              |
|------------------------------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Количество входящих частиц         | Диаметр частиц | Количество убегающих частиц | Среднее время пребывания | Максимальное время пребывания | Минимальное время пребывания |
| 3000                               | 50–75          | 2500                        | 114,989                  | 500,72                        | 76,434                       |
| 3000                               | 75–100         | 2500                        | 117,1248                 | 336,8                         | 76,442                       |
| 3000                               | 100–125        | 2500                        | 120,6557                 | 385,11                        | 76,771                       |
| 3000                               | 125–150        | 2500                        | 125,2558                 | 683,07                        | 77,055                       |
| 3000                               | 150–175        | 2500                        | 132,4923                 | 652,62                        | 78,235                       |
| 3000                               | 175–200        | 2499                        | 141,4718                 | 765,7                         | 77,555                       |
| 3000                               | 200–225        | 2494                        | 153,1952                 | 1108,9                        | 77,799                       |
| 3000                               | 225–250        | 2455                        | 171,7824                 | 1195                          | 79,195                       |
| 3000                               | 250–275        | 2287                        | 192,9548                 | 1191,8                        | 80,136                       |
| 3000                               | 275–300        | 1678                        | 217,6129                 | 1198,6                        | 79,556                       |
| Общее количество убегающих частиц  | -              | 23913                       | -                        | -                             | -                            |
| Общее количество осажденных частиц | -              | 6087                        | -                        | -                             | -                            |

| $u_{жс} = 0,03$ м/с        |                |                             |                          |                               |                              |
|----------------------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Количество входящих частиц | Диаметр частиц | Количество убегающих частиц | Среднее время пребывания | Максимальное время пребывания | Минимальное время пребывания |
| 3000                       | 50–75          | 2500                        | 106,1024                 | 315,48                        | 71,848                       |
| 3000                       | 75–100         | 2500                        | 107,6837                 | 333,3                         | 71,546                       |

|                                       |         |       |          |        |        |
|---------------------------------------|---------|-------|----------|--------|--------|
| 3000                                  | 100–125 | 2500  | 109,7245 | 320,49 | 71,982 |
| 3000                                  | 125–150 | 2500  | 113,2831 | 361    | 72,376 |
| 3000                                  | 150–175 | 2500  | 118,1633 | 760,55 | 73,36  |
| 3000                                  | 175–200 | 2500  | 124,365  | 658,46 | 72,534 |
| 3000                                  | 200–225 | 2500  | 132,7362 | 1121,6 | 72,734 |
| 3000                                  | 225–250 | 2483  | 146,0969 | 1187,3 | 73,425 |
| 3000                                  | 250–275 | 2414  | 164,4551 | 1186,7 | 74,408 |
| 3000                                  | 275–300 | 2119  | 184,7818 | 1197,6 | 74,55  |
| Общее количество<br>убегающих частиц  | -       | 24516 | -        | -      | -      |
| Общее количество<br>осажденных частиц | -       | 5484  | -        | -      | -      |

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Данные о зависимости эффективности осаждения при различных соотношениях площадей  $s\%$  и средней скорости потока воды  $u_{жс}$  и диаметра частиц: № 1:  $d_u = 50-75$  мкм; № 2:  $d_u = 75-100$  мкм; № 3:  $d_u = 100-125$  мкм; № 4:  $d_u = 125-150$  мкм; № 5:  $d_u = 150-175$  мкм; № 6:  $d_u = 175-200$  мкм; № 7:  $d_u = 200-225$  мкм; № 8:  $d_u = 225-250$  мкм; № 9:  $d_u = 250-275$  мкм; № 10:  $d_u = 275-300$  мкм

### № 1

| Соотношение площадей, $s\%$ | Скорость потока воды, $u_{жс}$ , м/с |       |       |       |       |       |
|-----------------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                             | 0,005                                | 0,01  | 0,015 | 0,02  | 0,025 | 0,03  |
| 10,00                       | 0,557                                | 0,502 | 0,457 | 0,419 | 0,39  | 0,369 |
| 10,77                       | 0,558                                | 0,499 | 0,449 | 0,409 | 0,38  | 0,36  |
| 11,54                       | 0,56                                 | 0,495 | 0,441 | 0,4   | 0,369 | 0,351 |
| 12,31                       | 0,561                                | 0,491 | 0,434 | 0,39  | 0,36  | 0,342 |
| 13,08                       | 0,562                                | 0,487 | 0,427 | 0,381 | 0,35  | 0,334 |
| 13,85                       | 0,563                                | 0,483 | 0,42  | 0,372 | 0,341 | 0,325 |
| 14,62                       | 0,564                                | 0,479 | 0,413 | 0,363 | 0,332 | 0,317 |
| 15,38                       | 0,564                                | 0,476 | 0,406 | 0,355 | 0,323 | 0,31  |
| 16,15                       | 0,565                                | 0,472 | 0,399 | 0,347 | 0,314 | 0,302 |
| 16,92                       | 0,565                                | 0,468 | 0,393 | 0,339 | 0,306 | 0,295 |
| 17,69                       | 0,565                                | 0,465 | 0,387 | 0,331 | 0,298 | 0,288 |
| 18,46                       | 0,565                                | 0,461 | 0,381 | 0,324 | 0,29  | 0,281 |
| 19,23                       | 0,565                                | 0,458 | 0,375 | 0,316 | 0,283 | 0,275 |
| 20,00                       | 0,565                                | 0,454 | 0,369 | 0,309 | 0,276 | 0,268 |
| 20,77                       | 0,565                                | 0,451 | 0,363 | 0,303 | 0,269 | 0,262 |
| 21,54                       | 0,564                                | 0,447 | 0,358 | 0,296 | 0,262 | 0,256 |
| 22,31                       | 0,564                                | 0,444 | 0,352 | 0,29  | 0,256 | 0,251 |
| 23,08                       | 0,563                                | 0,44  | 0,347 | 0,284 | 0,25  | 0,246 |
| 23,85                       | 0,562                                | 0,437 | 0,342 | 0,278 | 0,244 | 0,241 |
| 24,62                       | 0,561                                | 0,434 | 0,337 | 0,272 | 0,238 | 0,236 |
| 25,38                       | 0,56                                 | 0,43  | 0,333 | 0,267 | 0,233 | 0,231 |

|              |       |       |       |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>26,15</b> | 0,558 | 0,427 | 0,328 | 0,262 | 0,228 | 0,227 |
| <b>26,92</b> | 0,557 | 0,424 | 0,324 | 0,257 | 0,223 | 0,223 |
| <b>27,69</b> | 0,555 | 0,421 | 0,32  | 0,253 | 0,219 | 0,219 |
| <b>28,46</b> | 0,553 | 0,417 | 0,316 | 0,248 | 0,215 | 0,215 |
| <b>29,23</b> | 0,551 | 0,414 | 0,312 | 0,244 | 0,211 | 0,212 |
| <b>30,00</b> | 0,549 | 0,411 | 0,308 | 0,24  | 0,207 | 0,209 |
| <b>30,77</b> | 0,547 | 0,408 | 0,305 | 0,236 | 0,204 | 0,206 |
| <b>31,54</b> | 0,545 | 0,405 | 0,301 | 0,233 | 0,2   | 0,203 |
| <b>32,31</b> | 0,542 | 0,402 | 0,298 | 0,23  | 0,198 | 0,201 |
| <b>33,08</b> | 0,539 | 0,399 | 0,295 | 0,227 | 0,195 | 0,199 |
| <b>33,85</b> | 0,537 | 0,396 | 0,292 | 0,224 | 0,193 | 0,197 |
| <b>34,62</b> | 0,534 | 0,393 | 0,289 | 0,222 | 0,19  | 0,196 |
| <b>35,38</b> | 0,531 | 0,39  | 0,287 | 0,219 | 0,189 | 0,194 |
| <b>36,15</b> | 0,527 | 0,388 | 0,284 | 0,217 | 0,187 | 0,193 |
| <b>36,92</b> | 0,524 | 0,385 | 0,282 | 0,216 | 0,186 | 0,192 |
| <b>37,69</b> | 0,52  | 0,382 | 0,28  | 0,214 | 0,185 | 0,192 |
| <b>38,46</b> | 0,517 | 0,379 | 0,278 | 0,213 | 0,184 | 0,191 |
| <b>39,23</b> | 0,513 | 0,377 | 0,276 | 0,212 | 0,183 | 0,191 |
| <b>40,00</b> | 0,509 | 0,374 | 0,275 | 0,211 | 0,183 | 0,191 |

## № 2

| Соотношение<br>площадей, s% | Скорость потока воды, $u_{жс}$ , м/с |             |              |             |              |             |
|-----------------------------|--------------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|                             | <b>0,005</b>                         | <b>0,01</b> | <b>0,015</b> | <b>0,02</b> | <b>0,025</b> | <b>0,03</b> |
| <b>10,00</b>                | 0,663                                | 0,606       | 0,554        | 0,505       | 0,46         | 0,418       |
| <b>10,77</b>                | 0,661                                | 0,601       | 0,546        | 0,495       | 0,449        | 0,408       |
| <b>11,54</b>                | 0,658                                | 0,596       | 0,538        | 0,486       | 0,439        | 0,398       |
| <b>12,31</b>                | 0,656                                | 0,59        | 0,531        | 0,477       | 0,43         | 0,388       |
| <b>13,08</b>                | 0,653                                | 0,585       | 0,523        | 0,469       | 0,42         | 0,378       |
| <b>13,85</b>                | 0,65                                 | 0,58        | 0,516        | 0,46        | 0,411        | 0,369       |
| <b>14,62</b>                | 0,648                                | 0,575       | 0,509        | 0,452       | 0,402        | 0,36        |
| <b>15,38</b>                | 0,645                                | 0,57        | 0,502        | 0,443       | 0,393        | 0,352       |
| <b>16,15</b>                | 0,643                                | 0,565       | 0,495        | 0,436       | 0,385        | 0,343       |
| <b>16,92</b>                | 0,64                                 | 0,56        | 0,489        | 0,428       | 0,377        | 0,335       |

|              |       |       |       |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>17,69</b> | 0,638 | 0,555 | 0,482 | 0,42  | 0,369 | 0,327 |
| <b>18,46</b> | 0,635 | 0,55  | 0,476 | 0,413 | 0,361 | 0,32  |
| <b>19,23</b> | 0,633 | 0,545 | 0,47  | 0,406 | 0,353 | 0,313 |
| <b>20,00</b> | 0,63  | 0,541 | 0,463 | 0,399 | 0,346 | 0,306 |
| <b>20,77</b> | 0,627 | 0,536 | 0,457 | 0,392 | 0,339 | 0,299 |
| <b>21,54</b> | 0,625 | 0,531 | 0,452 | 0,385 | 0,332 | 0,293 |
| <b>22,31</b> | 0,622 | 0,527 | 0,446 | 0,379 | 0,326 | 0,287 |
| <b>23,08</b> | 0,62  | 0,523 | 0,44  | 0,373 | 0,32  | 0,281 |
| <b>23,85</b> | 0,617 | 0,518 | 0,435 | 0,367 | 0,314 | 0,276 |
| <b>24,62</b> | 0,614 | 0,514 | 0,43  | 0,361 | 0,308 | 0,271 |
| <b>25,38</b> | 0,612 | 0,51  | 0,424 | 0,355 | 0,303 | 0,266 |
| <b>26,15</b> | 0,609 | 0,506 | 0,419 | 0,35  | 0,297 | 0,262 |
| <b>26,92</b> | 0,606 | 0,502 | 0,415 | 0,345 | 0,292 | 0,257 |
| <b>27,69</b> | 0,604 | 0,498 | 0,41  | 0,34  | 0,288 | 0,254 |
| <b>28,46</b> | 0,601 | 0,494 | 0,405 | 0,335 | 0,283 | 0,25  |
| <b>29,23</b> | 0,599 | 0,49  | 0,401 | 0,33  | 0,279 | 0,247 |
| <b>30,00</b> | 0,596 | 0,486 | 0,396 | 0,326 | 0,275 | 0,244 |
| <b>30,77</b> | 0,593 | 0,483 | 0,392 | 0,322 | 0,271 | 0,241 |
| <b>31,54</b> | 0,591 | 0,479 | 0,388 | 0,318 | 0,268 | 0,238 |
| <b>32,31</b> | 0,588 | 0,476 | 0,384 | 0,314 | 0,265 | 0,236 |
| <b>33,08</b> | 0,585 | 0,472 | 0,38  | 0,31  | 0,262 | 0,234 |
| <b>33,85</b> | 0,582 | 0,469 | 0,377 | 0,307 | 0,259 | 0,233 |
| <b>34,62</b> | 0,58  | 0,465 | 0,373 | 0,304 | 0,256 | 0,232 |
| <b>35,38</b> | 0,577 | 0,462 | 0,37  | 0,301 | 0,254 | 0,231 |
| <b>36,15</b> | 0,574 | 0,459 | 0,367 | 0,298 | 0,252 | 0,23  |
| <b>36,92</b> | 0,572 | 0,456 | 0,363 | 0,295 | 0,251 | 0,23  |
| <b>37,69</b> | 0,569 | 0,453 | 0,361 | 0,293 | 0,249 | 0,23  |
| <b>38,46</b> | 0,566 | 0,45  | 0,358 | 0,29  | 0,248 | 0,23  |
| <b>39,23</b> | 0,564 | 0,447 | 0,355 | 0,288 | 0,247 | 0,23  |
| <b>40,00</b> | 0,561 | 0,444 | 0,352 | 0,287 | 0,246 | 0,231 |

## № 3

| Соотношение<br>площадей, $s\%$ | Скорость потока воды, $u_{ж}$ , м/с |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                | 0,005                               | 0,01  | 0,015 | 0,02  | 0,025 | 0,03  |
| 10,00                          | 0,854                               | 0,752 | 0,666 | 0,594 | 0,538 | 0,498 |
| 10,77                          | 0,846                               | 0,746 | 0,659 | 0,587 | 0,529 | 0,486 |
| 11,54                          | 0,838                               | 0,739 | 0,653 | 0,58  | 0,52  | 0,474 |
| 12,31                          | 0,83                                | 0,732 | 0,647 | 0,573 | 0,512 | 0,463 |
| 13,08                          | 0,822                               | 0,725 | 0,64  | 0,566 | 0,503 | 0,452 |
| 13,85                          | 0,814                               | 0,719 | 0,634 | 0,559 | 0,495 | 0,441 |
| 14,62                          | 0,806                               | 0,712 | 0,628 | 0,553 | 0,487 | 0,431 |
| 15,38                          | 0,799                               | 0,706 | 0,622 | 0,546 | 0,479 | 0,421 |
| 16,15                          | 0,791                               | 0,7   | 0,616 | 0,54  | 0,472 | 0,411 |
| 16,92                          | 0,784                               | 0,693 | 0,61  | 0,534 | 0,464 | 0,402 |
| 17,69                          | 0,776                               | 0,687 | 0,604 | 0,528 | 0,457 | 0,393 |
| 18,46                          | 0,769                               | 0,681 | 0,598 | 0,521 | 0,45  | 0,384 |
| 19,23                          | 0,762                               | 0,675 | 0,593 | 0,516 | 0,443 | 0,376 |
| 20,00                          | 0,755                               | 0,669 | 0,587 | 0,51  | 0,437 | 0,368 |
| 20,77                          | 0,748                               | 0,663 | 0,582 | 0,504 | 0,43  | 0,36  |
| 21,54                          | 0,741                               | 0,657 | 0,576 | 0,499 | 0,424 | 0,353 |
| 22,31                          | 0,735                               | 0,651 | 0,571 | 0,493 | 0,418 | 0,346 |
| 23,08                          | 0,728                               | 0,646 | 0,566 | 0,488 | 0,413 | 0,34  |
| 23,85                          | 0,722                               | 0,64  | 0,56  | 0,483 | 0,407 | 0,333 |
| 24,62                          | 0,716                               | 0,635 | 0,555 | 0,478 | 0,402 | 0,327 |
| 25,38                          | 0,709                               | 0,629 | 0,55  | 0,473 | 0,397 | 0,322 |
| 26,15                          | 0,703                               | 0,624 | 0,545 | 0,468 | 0,392 | 0,317 |
| 26,92                          | 0,697                               | 0,618 | 0,54  | 0,463 | 0,387 | 0,312 |
| 27,69                          | 0,691                               | 0,613 | 0,535 | 0,459 | 0,383 | 0,307 |
| 28,46                          | 0,686                               | 0,608 | 0,531 | 0,454 | 0,378 | 0,303 |
| 29,23                          | 0,68                                | 0,603 | 0,526 | 0,45  | 0,374 | 0,299 |
| 30,00                          | 0,674                               | 0,598 | 0,521 | 0,446 | 0,37  | 0,295 |
| 30,77                          | 0,669                               | 0,593 | 0,517 | 0,442 | 0,367 | 0,292 |
| 31,54                          | 0,664                               | 0,588 | 0,512 | 0,438 | 0,363 | 0,289 |
| 32,31                          | 0,658                               | 0,583 | 0,508 | 0,434 | 0,36  | 0,287 |
| 33,08                          | 0,653                               | 0,578 | 0,504 | 0,43  | 0,357 | 0,285 |

|              |       |       |       |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>33,85</b> | 0,648 | 0,574 | 0,499 | 0,426 | 0,354 | 0,283 |
| <b>34,62</b> | 0,644 | 0,569 | 0,495 | 0,423 | 0,352 | 0,281 |
| <b>35,38</b> | 0,639 | 0,564 | 0,491 | 0,42  | 0,349 | 0,28  |
| <b>36,15</b> | 0,634 | 0,56  | 0,487 | 0,416 | 0,347 | 0,279 |
| <b>36,92</b> | 0,63  | 0,555 | 0,483 | 0,413 | 0,345 | 0,279 |
| <b>37,69</b> | 0,625 | 0,551 | 0,479 | 0,41  | 0,343 | 0,279 |
| <b>38,46</b> | 0,621 | 0,547 | 0,476 | 0,407 | 0,342 | 0,279 |
| <b>39,23</b> | 0,617 | 0,543 | 0,472 | 0,405 | 0,34  | 0,279 |
| <b>40,00</b> | 0,612 | 0,539 | 0,468 | 0,402 | 0,339 | 0,28  |

## № 4

| <b>Соотношение<br/>площадей, s%</b> | <b>Скорость потока воды, <math>u_{ж}</math>, м/с</b> |             |              |             |              |             |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|                                     | <b>0,005</b>                                         | <b>0,01</b> | <b>0,015</b> | <b>0,02</b> | <b>0,025</b> | <b>0,03</b> |
| <b>10,00</b>                        | 0,953                                                | 0,863       | 0,782        | 0,709       | 0,646        | 0,591       |
| <b>10,77</b>                        | 0,948                                                | 0,858       | 0,776        | 0,703       | 0,638        | 0,58        |
| <b>11,54</b>                        | 0,944                                                | 0,854       | 0,771        | 0,697       | 0,629        | 0,57        |
| <b>12,31</b>                        | 0,939                                                | 0,849       | 0,766        | 0,69        | 0,622        | 0,56        |
| <b>13,08</b>                        | 0,934                                                | 0,844       | 0,761        | 0,684       | 0,614        | 0,55        |
| <b>13,85</b>                        | 0,93                                                 | 0,839       | 0,756        | 0,678       | 0,606        | 0,541       |
| <b>14,62</b>                        | 0,925                                                | 0,835       | 0,75         | 0,672       | 0,599        | 0,531       |
| <b>15,38</b>                        | 0,92                                                 | 0,83        | 0,745        | 0,666       | 0,591        | 0,522       |
| <b>16,15</b>                        | 0,914                                                | 0,825       | 0,74         | 0,66        | 0,584        | 0,514       |
| <b>16,92</b>                        | 0,909                                                | 0,82        | 0,735        | 0,654       | 0,577        | 0,505       |
| <b>17,69</b>                        | 0,904                                                | 0,815       | 0,73         | 0,648       | 0,571        | 0,497       |
| <b>18,46</b>                        | 0,899                                                | 0,81        | 0,725        | 0,643       | 0,564        | 0,489       |
| <b>19,23</b>                        | 0,893                                                | 0,805       | 0,72         | 0,637       | 0,558        | 0,481       |
| <b>20,00</b>                        | 0,888                                                | 0,8         | 0,715        | 0,632       | 0,551        | 0,473       |
| <b>20,77</b>                        | 0,882                                                | 0,795       | 0,71         | 0,627       | 0,545        | 0,466       |
| <b>21,54</b>                        | 0,876                                                | 0,79        | 0,705        | 0,621       | 0,539        | 0,459       |
| <b>22,31</b>                        | 0,87                                                 | 0,785       | 0,7          | 0,616       | 0,534        | 0,452       |
| <b>23,08</b>                        | 0,865                                                | 0,779       | 0,695        | 0,611       | 0,528        | 0,445       |
| <b>23,85</b>                        | 0,859                                                | 0,774       | 0,69         | 0,606       | 0,522        | 0,439       |
| <b>24,62</b>                        | 0,853                                                | 0,769       | 0,685        | 0,601       | 0,517        | 0,433       |

|              |       |       |       |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>25,38</b> | 0,846 | 0,764 | 0,68  | 0,596 | 0,512 | 0,427 |
| <b>26,15</b> | 0,84  | 0,758 | 0,675 | 0,592 | 0,507 | 0,422 |
| <b>26,92</b> | 0,834 | 0,753 | 0,671 | 0,587 | 0,502 | 0,416 |
| <b>27,69</b> | 0,827 | 0,747 | 0,666 | 0,583 | 0,498 | 0,411 |
| <b>28,46</b> | 0,821 | 0,742 | 0,661 | 0,578 | 0,493 | 0,406 |
| <b>29,23</b> | 0,814 | 0,736 | 0,656 | 0,574 | 0,489 | 0,402 |
| <b>30,00</b> | 0,807 | 0,731 | 0,652 | 0,57  | 0,485 | 0,398 |
| <b>30,77</b> | 0,801 | 0,725 | 0,647 | 0,566 | 0,481 | 0,394 |
| <b>31,54</b> | 0,794 | 0,72  | 0,642 | 0,561 | 0,477 | 0,39  |
| <b>32,31</b> | 0,787 | 0,714 | 0,638 | 0,558 | 0,474 | 0,386 |
| <b>33,08</b> | 0,78  | 0,708 | 0,633 | 0,554 | 0,47  | 0,383 |
| <b>33,85</b> | 0,773 | 0,703 | 0,628 | 0,55  | 0,467 | 0,38  |
| <b>34,62</b> | 0,765 | 0,697 | 0,624 | 0,546 | 0,464 | 0,377 |
| <b>35,38</b> | 0,758 | 0,691 | 0,619 | 0,543 | 0,461 | 0,374 |
| <b>36,15</b> | 0,75  | 0,685 | 0,615 | 0,539 | 0,458 | 0,372 |
| <b>36,92</b> | 0,743 | 0,679 | 0,61  | 0,536 | 0,456 | 0,37  |
| <b>37,69</b> | 0,735 | 0,673 | 0,606 | 0,532 | 0,453 | 0,368 |
| <b>38,46</b> | 0,728 | 0,668 | 0,601 | 0,529 | 0,451 | 0,367 |
| <b>39,23</b> | 0,72  | 0,662 | 0,597 | 0,526 | 0,449 | 0,365 |
| <b>40,00</b> | 0,712 | 0,656 | 0,593 | 0,523 | 0,447 | 0,364 |

## № 5

| Соотношение<br>площадей, s% | Скорость потока воды, $u_{ж}$ , м/с |       |       |       |       |       |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                             | 0,005                               | 0,01  | 0,015 | 0,02  | 0,025 | 0,03  |
| <b>10,00</b>                | 1                                   | 0,941 | 0,873 | 0,809 | 0,747 | 0,689 |
| <b>10,77</b>                | 1                                   | 0,941 | 0,87  | 0,803 | 0,74  | 0,681 |
| <b>11,54</b>                | 1                                   | 0,94  | 0,867 | 0,797 | 0,733 | 0,673 |
| <b>12,31</b>                | 1                                   | 0,94  | 0,863 | 0,792 | 0,726 | 0,665 |
| <b>13,08</b>                | 1                                   | 0,939 | 0,86  | 0,786 | 0,719 | 0,657 |
| <b>13,85</b>                | 1                                   | 0,938 | 0,856 | 0,781 | 0,712 | 0,65  |
| <b>14,62</b>                | 1                                   | 0,937 | 0,853 | 0,775 | 0,705 | 0,642 |
| <b>15,38</b>                | 1                                   | 0,936 | 0,849 | 0,77  | 0,699 | 0,635 |
| <b>16,15</b>                | 1                                   | 0,934 | 0,845 | 0,765 | 0,692 | 0,628 |

|              |       |       |       |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>16,92</b> | 1     | 0,933 | 0,842 | 0,759 | 0,686 | 0,621 |
| <b>17,69</b> | 1     | 0,931 | 0,838 | 0,754 | 0,679 | 0,614 |
| <b>18,46</b> | 1     | 0,929 | 0,834 | 0,749 | 0,673 | 0,607 |
| <b>19,23</b> | 1     | 0,927 | 0,831 | 0,744 | 0,667 | 0,6   |
| <b>20,00</b> | 1     | 0,925 | 0,827 | 0,739 | 0,661 | 0,594 |
| <b>20,77</b> | 1     | 0,922 | 0,823 | 0,734 | 0,655 | 0,588 |
| <b>21,54</b> | 1     | 0,92  | 0,819 | 0,729 | 0,65  | 0,581 |
| <b>22,31</b> | 1     | 0,917 | 0,815 | 0,724 | 0,644 | 0,575 |
| <b>23,08</b> | 1     | 0,914 | 0,811 | 0,719 | 0,639 | 0,57  |
| <b>23,85</b> | 1     | 0,911 | 0,807 | 0,715 | 0,633 | 0,564 |
| <b>24,62</b> | 1     | 0,908 | 0,803 | 0,71  | 0,628 | 0,558 |
| <b>25,38</b> | 1     | 0,905 | 0,799 | 0,705 | 0,623 | 0,553 |
| <b>26,15</b> | 1     | 0,901 | 0,795 | 0,701 | 0,618 | 0,547 |
| <b>26,92</b> | 1     | 0,898 | 0,791 | 0,696 | 0,613 | 0,542 |
| <b>27,69</b> | 1     | 0,894 | 0,787 | 0,692 | 0,609 | 0,537 |
| <b>28,46</b> | 1     | 0,89  | 0,783 | 0,688 | 0,604 | 0,532 |
| <b>29,23</b> | 1     | 0,886 | 0,779 | 0,683 | 0,6   | 0,528 |
| <b>30,00</b> | 1     | 0,881 | 0,774 | 0,679 | 0,595 | 0,523 |
| <b>30,77</b> | 0,995 | 0,877 | 0,77  | 0,675 | 0,591 | 0,519 |
| <b>31,54</b> | 0,99  | 0,872 | 0,766 | 0,671 | 0,587 | 0,515 |
| <b>32,31</b> | 0,985 | 0,867 | 0,761 | 0,667 | 0,583 | 0,51  |
| <b>33,08</b> | 0,979 | 0,863 | 0,757 | 0,662 | 0,579 | 0,506 |
| <b>33,85</b> | 0,973 | 0,857 | 0,753 | 0,659 | 0,575 | 0,503 |
| <b>34,62</b> | 0,967 | 0,852 | 0,748 | 0,655 | 0,572 | 0,499 |
| <b>35,38</b> | 0,96  | 0,847 | 0,744 | 0,651 | 0,568 | 0,495 |
| <b>36,15</b> | 0,953 | 0,841 | 0,739 | 0,647 | 0,565 | 0,492 |
| <b>36,92</b> | 0,946 | 0,835 | 0,735 | 0,643 | 0,561 | 0,489 |
| <b>37,69</b> | 0,938 | 0,829 | 0,73  | 0,64  | 0,558 | 0,486 |
| <b>38,46</b> | 0,93  | 0,823 | 0,725 | 0,636 | 0,555 | 0,483 |
| <b>39,23</b> | 0,922 | 0,817 | 0,721 | 0,632 | 0,552 | 0,48  |
| <b>40,00</b> | 0,913 | 0,811 | 0,716 | 0,629 | 0,549 | 0,477 |

## № 6

| Соотношение<br>площадей, $s\%$ | Скорость потока воды, $u_{ж}$ , м/с |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                | 0,005                               | 0,01  | 0,015 | 0,02  | 0,025 | 0,03  |
| 10,00                          | 1                                   | 0,969 | 0,923 | 0,875 | 0,828 | 0,78  |
| 10,77                          | 1                                   | 0,97  | 0,922 | 0,874 | 0,824 | 0,773 |
| 11,54                          | 1                                   | 0,97  | 0,922 | 0,872 | 0,82  | 0,765 |
| 12,31                          | 1                                   | 0,97  | 0,921 | 0,87  | 0,816 | 0,758 |
| 13,08                          | 1                                   | 0,97  | 0,921 | 0,868 | 0,811 | 0,752 |
| 13,85                          | 1                                   | 0,97  | 0,92  | 0,865 | 0,807 | 0,745 |
| 14,62                          | 1                                   | 0,97  | 0,919 | 0,863 | 0,803 | 0,738 |
| 15,38                          | 1                                   | 0,969 | 0,918 | 0,861 | 0,799 | 0,731 |
| 16,15                          | 1                                   | 0,969 | 0,916 | 0,858 | 0,794 | 0,725 |
| 16,92                          | 1                                   | 0,968 | 0,915 | 0,856 | 0,79  | 0,718 |
| 17,69                          | 1                                   | 0,967 | 0,913 | 0,853 | 0,786 | 0,712 |
| 18,46                          | 1                                   | 0,967 | 0,912 | 0,85  | 0,781 | 0,705 |
| 19,23                          | 1                                   | 0,966 | 0,91  | 0,847 | 0,777 | 0,699 |
| 20,00                          | 1                                   | 0,965 | 0,908 | 0,844 | 0,772 | 0,693 |
| 20,77                          | 1                                   | 0,964 | 0,906 | 0,841 | 0,768 | 0,687 |
| 21,54                          | 1                                   | 0,962 | 0,904 | 0,837 | 0,763 | 0,681 |
| 22,31                          | 1                                   | 0,961 | 0,901 | 0,834 | 0,758 | 0,675 |
| 23,08                          | 1                                   | 0,959 | 0,899 | 0,83  | 0,754 | 0,669 |
| 23,85                          | 1                                   | 0,958 | 0,896 | 0,827 | 0,749 | 0,663 |
| 24,62                          | 1                                   | 0,956 | 0,894 | 0,823 | 0,744 | 0,657 |
| 25,38                          | 1                                   | 0,954 | 0,891 | 0,819 | 0,739 | 0,651 |
| 26,15                          | 1                                   | 0,952 | 0,888 | 0,815 | 0,735 | 0,646 |
| 26,92                          | 1                                   | 0,95  | 0,885 | 0,811 | 0,73  | 0,64  |
| 27,69                          | 1                                   | 0,948 | 0,881 | 0,807 | 0,725 | 0,635 |
| 28,46                          | 1                                   | 0,946 | 0,878 | 0,803 | 0,72  | 0,629 |
| 29,23                          | 1                                   | 0,944 | 0,875 | 0,798 | 0,715 | 0,624 |
| 30,00                          | 1                                   | 0,941 | 0,871 | 0,794 | 0,71  | 0,619 |
| 30,77                          | 1                                   | 0,938 | 0,867 | 0,789 | 0,705 | 0,614 |
| 31,54                          | 1                                   | 0,936 | 0,863 | 0,784 | 0,7   | 0,609 |
| 32,31                          | 1                                   | 0,933 | 0,859 | 0,78  | 0,694 | 0,604 |
| 33,08                          | 1                                   | 0,93  | 0,855 | 0,775 | 0,689 | 0,599 |

|              |       |       |       |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>33,85</b> | 0,999 | 0,927 | 0,851 | 0,77  | 0,684 | 0,594 |
| <b>34,62</b> | 0,998 | 0,924 | 0,846 | 0,764 | 0,679 | 0,589 |
| <b>35,38</b> | 0,996 | 0,921 | 0,842 | 0,759 | 0,673 | 0,584 |
| <b>36,15</b> | 0,995 | 0,917 | 0,837 | 0,754 | 0,668 | 0,58  |
| <b>36,92</b> | 0,994 | 0,914 | 0,832 | 0,748 | 0,663 | 0,575 |
| <b>37,69</b> | 0,992 | 0,91  | 0,827 | 0,743 | 0,657 | 0,571 |
| <b>38,46</b> | 0,991 | 0,906 | 0,822 | 0,737 | 0,652 | 0,566 |
| <b>39,23</b> | 0,989 | 0,903 | 0,817 | 0,731 | 0,646 | 0,562 |
| <b>40,00</b> | 0,988 | 0,899 | 0,811 | 0,725 | 0,641 | 0,558 |

## № 7

| <b>Соотношение<br/>площадей, s%</b> | <b>Скорость потока воды, <math>u_{ж}</math>, м/с</b> |             |              |             |              |             |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|                                     | <b>0,005</b>                                         | <b>0,01</b> | <b>0,015</b> | <b>0,02</b> | <b>0,025</b> | <b>0,03</b> |
| <b>10,00</b>                        | 1                                                    | 0,988       | 0,964        | 0,934       | 0,899        | 0,858       |
| <b>10,77</b>                        | 1                                                    | 0,989       | 0,965        | 0,934       | 0,897        | 0,853       |
| <b>11,54</b>                        | 1                                                    | 0,99        | 0,965        | 0,933       | 0,894        | 0,848       |
| <b>12,31</b>                        | 1                                                    | 0,99        | 0,965        | 0,932       | 0,892        | 0,843       |
| <b>13,08</b>                        | 1                                                    | 0,99        | 0,965        | 0,931       | 0,889        | 0,839       |
| <b>13,85</b>                        | 1                                                    | 0,99        | 0,965        | 0,93        | 0,887        | 0,834       |
| <b>14,62</b>                        | 1                                                    | 0,99        | 0,965        | 0,929       | 0,884        | 0,829       |
| <b>15,38</b>                        | 1                                                    | 0,99        | 0,964        | 0,927       | 0,881        | 0,824       |
| <b>16,15</b>                        | 1                                                    | 0,99        | 0,963        | 0,926       | 0,878        | 0,819       |
| <b>16,92</b>                        | 1                                                    | 0,99        | 0,962        | 0,924       | 0,875        | 0,815       |
| <b>17,69</b>                        | 1                                                    | 0,989       | 0,961        | 0,922       | 0,872        | 0,81        |
| <b>18,46</b>                        | 1                                                    | 0,989       | 0,96         | 0,92        | 0,868        | 0,805       |
| <b>19,23</b>                        | 1                                                    | 0,988       | 0,959        | 0,918       | 0,865        | 0,8         |
| <b>20,00</b>                        | 1                                                    | 0,987       | 0,957        | 0,915       | 0,861        | 0,795       |
| <b>20,77</b>                        | 1                                                    | 0,986       | 0,955        | 0,913       | 0,858        | 0,791       |
| <b>21,54</b>                        | 1                                                    | 0,985       | 0,953        | 0,91        | 0,854        | 0,786       |
| <b>22,31</b>                        | 1                                                    | 0,984       | 0,951        | 0,907       | 0,85         | 0,781       |
| <b>23,08</b>                        | 1                                                    | 0,982       | 0,949        | 0,904       | 0,846        | 0,776       |
| <b>23,85</b>                        | 1                                                    | 0,981       | 0,947        | 0,9         | 0,842        | 0,771       |
| <b>24,62</b>                        | 1                                                    | 0,979       | 0,944        | 0,897       | 0,838        | 0,766       |

|              |       |       |       |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>25,38</b> | 1     | 0,978 | 0,941 | 0,893 | 0,833 | 0,762 |
| <b>26,15</b> | 1     | 0,976 | 0,938 | 0,89  | 0,829 | 0,757 |
| <b>26,92</b> | 1     | 0,974 | 0,935 | 0,886 | 0,825 | 0,752 |
| <b>27,69</b> | 1     | 0,972 | 0,932 | 0,882 | 0,82  | 0,747 |
| <b>28,46</b> | 0,999 | 0,969 | 0,929 | 0,877 | 0,815 | 0,742 |
| <b>29,23</b> | 0,999 | 0,967 | 0,925 | 0,873 | 0,81  | 0,738 |
| <b>30,00</b> | 0,998 | 0,965 | 0,921 | 0,868 | 0,805 | 0,733 |
| <b>30,77</b> | 0,997 | 0,962 | 0,917 | 0,863 | 0,8   | 0,728 |
| <b>31,54</b> | 0,997 | 0,959 | 0,913 | 0,859 | 0,795 | 0,723 |
| <b>32,31</b> | 0,996 | 0,956 | 0,909 | 0,853 | 0,79  | 0,718 |
| <b>33,08</b> | 0,995 | 0,953 | 0,904 | 0,848 | 0,785 | 0,714 |
| <b>33,85</b> | 0,994 | 0,95  | 0,9   | 0,843 | 0,779 | 0,709 |
| <b>34,62</b> | 0,993 | 0,947 | 0,895 | 0,837 | 0,773 | 0,704 |
| <b>35,38</b> | 0,992 | 0,944 | 0,89  | 0,831 | 0,768 | 0,699 |
| <b>36,15</b> | 0,991 | 0,94  | 0,885 | 0,826 | 0,762 | 0,694 |
| <b>36,92</b> | 0,99  | 0,937 | 0,88  | 0,819 | 0,756 | 0,69  |
| <b>37,69</b> | 0,989 | 0,933 | 0,874 | 0,813 | 0,75  | 0,685 |
| <b>38,46</b> | 0,988 | 0,929 | 0,868 | 0,807 | 0,744 | 0,68  |
| <b>39,23</b> | 0,987 | 0,925 | 0,863 | 0,8   | 0,738 | 0,675 |
| <b>40,00</b> | 0,986 | 0,921 | 0,857 | 0,793 | 0,731 | 0,67  |

## № 8

| Соотношение<br>площадей, s% | Скорость потока воды, $u_{ж}$ , м/с |       |       |       |       |       |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                             | 0,005                               | 0,01  | 0,015 | 0,02  | 0,025 | 0,03  |
| <b>10,00</b>                | 1,000                               | 0,997 | 0,989 | 0,978 | 0,965 | 0,950 |
| <b>10,77</b>                | 1,000                               | 0,997 | 0,988 | 0,976 | 0,961 | 0,943 |
| <b>11,54</b>                | 1,000                               | 0,997 | 0,988 | 0,975 | 0,957 | 0,936 |
| <b>12,31</b>                | 1,000                               | 0,997 | 0,988 | 0,973 | 0,953 | 0,929 |
| <b>13,08</b>                | 1,000                               | 0,997 | 0,987 | 0,971 | 0,949 | 0,922 |
| <b>13,85</b>                | 1,000                               | 0,997 | 0,986 | 0,969 | 0,945 | 0,915 |
| <b>14,62</b>                | 1,000                               | 0,997 | 0,986 | 0,967 | 0,941 | 0,908 |
| <b>15,38</b>                | 1,000                               | 0,997 | 0,985 | 0,965 | 0,937 | 0,902 |
| <b>16,15</b>                | 1,000                               | 0,997 | 0,984 | 0,963 | 0,933 | 0,895 |

|              |       |       |       |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>16,92</b> | 1,000 | 0,996 | 0,983 | 0,961 | 0,929 | 0,889 |
| <b>17,69</b> | 1,000 | 0,996 | 0,982 | 0,958 | 0,925 | 0,883 |
| <b>18,46</b> | 1,000 | 0,995 | 0,980 | 0,956 | 0,921 | 0,877 |
| <b>19,23</b> | 1,000 | 0,995 | 0,979 | 0,953 | 0,917 | 0,871 |
| <b>20,00</b> | 1,000 | 0,994 | 0,978 | 0,951 | 0,913 | 0,865 |
| <b>20,77</b> | 1,000 | 0,993 | 0,976 | 0,948 | 0,909 | 0,860 |
| <b>21,54</b> | 0,999 | 0,992 | 0,974 | 0,945 | 0,905 | 0,854 |
| <b>22,31</b> | 0,999 | 0,991 | 0,973 | 0,943 | 0,901 | 0,849 |
| <b>23,08</b> | 0,999 | 0,990 | 0,971 | 0,940 | 0,897 | 0,844 |
| <b>23,85</b> | 0,998 | 0,989 | 0,969 | 0,937 | 0,893 | 0,838 |
| <b>24,62</b> | 0,998 | 0,988 | 0,967 | 0,934 | 0,889 | 0,833 |
| <b>25,38</b> | 0,998 | 0,987 | 0,964 | 0,931 | 0,885 | 0,829 |
| <b>26,15</b> | 0,997 | 0,985 | 0,962 | 0,927 | 0,881 | 0,824 |
| <b>26,92</b> | 0,997 | 0,984 | 0,960 | 0,924 | 0,877 | 0,819 |
| <b>27,69</b> | 0,997 | 0,982 | 0,957 | 0,921 | 0,873 | 0,815 |
| <b>28,46</b> | 0,996 | 0,981 | 0,954 | 0,917 | 0,869 | 0,810 |
| <b>29,23</b> | 0,996 | 0,979 | 0,952 | 0,914 | 0,865 | 0,806 |
| <b>30,00</b> | 0,996 | 0,977 | 0,949 | 0,910 | 0,861 | 0,802 |
| <b>30,77</b> | 0,995 | 0,975 | 0,946 | 0,906 | 0,857 | 0,798 |
| <b>31,54</b> | 0,995 | 0,973 | 0,943 | 0,903 | 0,853 | 0,794 |
| <b>32,31</b> | 0,994 | 0,971 | 0,940 | 0,899 | 0,849 | 0,791 |
| <b>33,08</b> | 0,994 | 0,969 | 0,936 | 0,895 | 0,845 | 0,787 |
| <b>33,85</b> | 0,993 | 0,967 | 0,933 | 0,891 | 0,841 | 0,784 |
| <b>34,62</b> | 0,993 | 0,965 | 0,929 | 0,887 | 0,837 | 0,780 |
| <b>35,38</b> | 0,992 | 0,962 | 0,926 | 0,883 | 0,833 | 0,777 |
| <b>36,15</b> | 0,992 | 0,960 | 0,922 | 0,879 | 0,829 | 0,774 |
| <b>36,92</b> | 0,992 | 0,957 | 0,918 | 0,874 | 0,825 | 0,771 |
| <b>37,69</b> | 0,991 | 0,955 | 0,914 | 0,870 | 0,821 | 0,769 |
| <b>38,46</b> | 0,991 | 0,952 | 0,910 | 0,865 | 0,817 | 0,766 |
| <b>39,23</b> | 0,990 | 0,949 | 0,906 | 0,861 | 0,813 | 0,763 |
| <b>40,00</b> | 0,990 | 0,946 | 0,902 | 0,856 | 0,809 | 0,761 |

## № 9

| Соотношение<br>площадей, $s\%$ | Скорость потока воды, $u_{ж}$ , м/с |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                | 0,005                               | 0,01  | 0,015 | 0,02  | 0,025 | 0,03  |
| 10,00                          | 1,000                               | 1,000 | 0,997 | 0,992 | 0,983 | 0,972 |
| 10,77                          | 1,000                               | 1,000 | 0,997 | 0,990 | 0,980 | 0,966 |
| 11,54                          | 1,000                               | 1,000 | 0,996 | 0,988 | 0,976 | 0,961 |
| 12,31                          | 1,000                               | 1,000 | 0,996 | 0,987 | 0,973 | 0,955 |
| 13,08                          | 1,000                               | 1,000 | 0,995 | 0,985 | 0,970 | 0,950 |
| 13,85                          | 1,000                               | 1,000 | 0,994 | 0,983 | 0,966 | 0,945 |
| 14,62                          | 1,000                               | 0,999 | 0,993 | 0,981 | 0,963 | 0,940 |
| 15,38                          | 1,000                               | 0,999 | 0,992 | 0,979 | 0,960 | 0,934 |
| 16,15                          | 1,000                               | 0,998 | 0,991 | 0,977 | 0,956 | 0,929 |
| 16,92                          | 0,999                               | 0,998 | 0,990 | 0,975 | 0,953 | 0,925 |
| 17,69                          | 0,999                               | 0,997 | 0,989 | 0,973 | 0,950 | 0,920 |
| 18,46                          | 0,999                               | 0,997 | 0,987 | 0,970 | 0,946 | 0,915 |
| 19,23                          | 0,999                               | 0,996 | 0,986 | 0,968 | 0,943 | 0,910 |
| 20,00                          | 0,999                               | 0,995 | 0,984 | 0,966 | 0,940 | 0,906 |
| 20,77                          | 0,999                               | 0,995 | 0,983 | 0,963 | 0,936 | 0,901 |
| 21,54                          | 0,998                               | 0,994 | 0,981 | 0,961 | 0,933 | 0,897 |
| 22,31                          | 0,998                               | 0,993 | 0,979 | 0,958 | 0,929 | 0,892 |
| 23,08                          | 0,998                               | 0,992 | 0,978 | 0,956 | 0,926 | 0,888 |
| 23,85                          | 0,998                               | 0,991 | 0,976 | 0,953 | 0,923 | 0,884 |
| 24,62                          | 0,998                               | 0,990 | 0,974 | 0,950 | 0,919 | 0,880 |
| 25,38                          | 0,997                               | 0,988 | 0,972 | 0,948 | 0,916 | 0,876 |
| 26,15                          | 0,997                               | 0,987 | 0,970 | 0,945 | 0,912 | 0,872 |
| 26,92                          | 0,997                               | 0,986 | 0,968 | 0,942 | 0,909 | 0,868 |
| 27,69                          | 0,997                               | 0,985 | 0,965 | 0,939 | 0,905 | 0,865 |
| 28,46                          | 0,996                               | 0,983 | 0,963 | 0,936 | 0,902 | 0,861 |
| 29,23                          | 0,996                               | 0,982 | 0,961 | 0,933 | 0,899 | 0,857 |
| 30,00                          | 0,996                               | 0,980 | 0,958 | 0,930 | 0,895 | 0,854 |
| 30,77                          | 0,996                               | 0,979 | 0,956 | 0,927 | 0,892 | 0,851 |
| 31,54                          | 0,995                               | 0,977 | 0,953 | 0,923 | 0,888 | 0,847 |
| 32,31                          | 0,995                               | 0,975 | 0,950 | 0,920 | 0,885 | 0,844 |
| 33,08                          | 0,995                               | 0,973 | 0,948 | 0,917 | 0,881 | 0,841 |

|              |       |       |       |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>33,85</b> | 0,994 | 0,972 | 0,945 | 0,913 | 0,878 | 0,838 |
| <b>34,62</b> | 0,994 | 0,970 | 0,942 | 0,910 | 0,874 | 0,835 |
| <b>35,38</b> | 0,994 | 0,968 | 0,939 | 0,906 | 0,871 | 0,832 |
| <b>36,15</b> | 0,993 | 0,966 | 0,936 | 0,903 | 0,867 | 0,829 |
| <b>36,92</b> | 0,993 | 0,964 | 0,932 | 0,899 | 0,864 | 0,826 |
| <b>37,69</b> | 0,993 | 0,962 | 0,929 | 0,895 | 0,860 | 0,824 |
| <b>38,46</b> | 0,992 | 0,959 | 0,926 | 0,892 | 0,857 | 0,821 |
| <b>39,23</b> | 0,992 | 0,957 | 0,922 | 0,888 | 0,853 | 0,819 |
| <b>40,00</b> | 0,992 | 0,955 | 0,919 | 0,884 | 0,850 | 0,816 |

## № 10

| Соотношение<br>площадей, s% | Скорость потока воды, $u_{ж}$ , м/с |       |       |       |       |       |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                             | 0,005                               | 0,01  | 0,015 | 0,02  | 0,025 | 0,03  |
| <b>10,00</b>                | 0,999                               | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,997 | 0,989 |
| <b>10,77</b>                | 0,999                               | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,994 | 0,985 |
| <b>11,54</b>                | 0,999                               | 1,000 | 1,000 | 0,998 | 0,991 | 0,981 |
| <b>12,31</b>                | 0,999                               | 1,000 | 1,000 | 0,996 | 0,988 | 0,977 |
| <b>13,08</b>                | 1,000                               | 1,000 | 0,999 | 0,993 | 0,985 | 0,973 |
| <b>13,85</b>                | 1,000                               | 1,000 | 0,998 | 0,991 | 0,982 | 0,968 |
| <b>14,62</b>                | 1,000                               | 1,000 | 0,996 | 0,989 | 0,979 | 0,964 |
| <b>15,38</b>                | 1,000                               | 0,999 | 0,995 | 0,987 | 0,976 | 0,960 |
| <b>16,15</b>                | 1,000                               | 0,999 | 0,994 | 0,985 | 0,973 | 0,956 |
| <b>16,92</b>                | 1,000                               | 0,998 | 0,992 | 0,983 | 0,969 | 0,952 |
| <b>17,69</b>                | 1,000                               | 0,997 | 0,991 | 0,981 | 0,966 | 0,948 |
| <b>18,46</b>                | 0,999                               | 0,996 | 0,989 | 0,978 | 0,963 | 0,945 |
| <b>19,23</b>                | 0,999                               | 0,996 | 0,988 | 0,976 | 0,960 | 0,941 |
| <b>20,00</b>                | 0,999                               | 0,995 | 0,986 | 0,974 | 0,957 | 0,937 |
| <b>20,77</b>                | 0,999                               | 0,994 | 0,985 | 0,971 | 0,954 | 0,933 |
| <b>21,54</b>                | 0,999                               | 0,993 | 0,983 | 0,969 | 0,951 | 0,929 |
| <b>22,31</b>                | 0,999                               | 0,992 | 0,981 | 0,967 | 0,948 | 0,926 |
| <b>23,08</b>                | 0,998                               | 0,991 | 0,980 | 0,964 | 0,945 | 0,922 |
| <b>23,85</b>                | 0,998                               | 0,990 | 0,978 | 0,962 | 0,942 | 0,918 |
| <b>24,62</b>                | 0,998                               | 0,989 | 0,976 | 0,960 | 0,939 | 0,915 |

|              |       |       |       |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>25,38</b> | 0,998 | 0,988 | 0,974 | 0,957 | 0,936 | 0,911 |
| <b>26,15</b> | 0,997 | 0,987 | 0,973 | 0,955 | 0,933 | 0,908 |
| <b>26,92</b> | 0,997 | 0,986 | 0,971 | 0,952 | 0,930 | 0,904 |
| <b>27,69</b> | 0,996 | 0,984 | 0,969 | 0,950 | 0,927 | 0,901 |
| <b>28,46</b> | 0,996 | 0,983 | 0,967 | 0,947 | 0,924 | 0,897 |
| <b>29,23</b> | 0,996 | 0,982 | 0,965 | 0,945 | 0,921 | 0,894 |
| <b>30,00</b> | 0,995 | 0,981 | 0,963 | 0,942 | 0,918 | 0,891 |
| <b>30,77</b> | 0,995 | 0,979 | 0,961 | 0,940 | 0,915 | 0,887 |
| <b>31,54</b> | 0,994 | 0,978 | 0,959 | 0,937 | 0,912 | 0,884 |
| <b>32,31</b> | 0,993 | 0,977 | 0,957 | 0,934 | 0,909 | 0,881 |
| <b>33,08</b> | 0,993 | 0,975 | 0,955 | 0,932 | 0,906 | 0,877 |
| <b>33,85</b> | 0,992 | 0,974 | 0,953 | 0,929 | 0,903 | 0,874 |
| <b>34,62</b> | 0,992 | 0,972 | 0,950 | 0,926 | 0,900 | 0,871 |
| <b>35,38</b> | 0,991 | 0,971 | 0,948 | 0,924 | 0,897 | 0,868 |
| <b>36,15</b> | 0,990 | 0,969 | 0,946 | 0,921 | 0,894 | 0,865 |
| <b>36,92</b> | 0,990 | 0,967 | 0,944 | 0,918 | 0,891 | 0,862 |
| <b>37,69</b> | 0,989 | 0,966 | 0,941 | 0,915 | 0,888 | 0,859 |
| <b>38,46</b> | 0,988 | 0,964 | 0,939 | 0,913 | 0,885 | 0,856 |
| <b>39,23</b> | 0,987 | 0,962 | 0,937 | 0,910 | 0,882 | 0,853 |
| <b>40,00</b> | 0,986 | 0,961 | 0,934 | 0,907 | 0,879 | 0,850 |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Данные о концентрации взвешенных частиц и значениях ХПК в полупроизводственном эксперименте:

### 1. Концентрация входящих взвешенных веществ, 2000 мг/л, ХПК 3163 мг/л, БПК<sub>5</sub> 1582 мг/л.

| Расход, л/с | Конструкция | Мутность по времени, NTU |        |        |        |        |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |
|-------------|-------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
|             |             | 1,5мин                   | 3мин   | 4,5мин | 6мин   | 7,5мин | 9мин   | 10,5мин | 12мин  | 13,5мин | 15мин  | 16,5мин | 18мин  | 19,5мин | 21мин  | 22,5мин | 24мин  | 25,5мин | 27мин  | 28,5мин | 30мин  |
| 3,8         | без         | 1689,4                   | 1676,7 | 1716,5 | 1714,5 | 1720,2 | 1711,0 | 1720,3  | 1689,9 | 1682,7  | 1712,7 | 1721,2  | 1695,8 | 1709,6  | 1709,8 | 1690,0  | 1698,8 | 1703,6  | 1682,7 | 1678,8  | 1692,0 |
|             | класси.     | 1883,9                   | 1917,7 | 1899,9 | 1928,3 | 1877,3 | 1909,7 | 1905,6  | 1878,7 | 1923,9  | 1879,0 | 1878,5  | 1915,2 | 1915,1  | 1911,5 | 1928,3  | 1910,3 | 1883,0  | 1909,6 | 1895,2  | 1925,6 |
|             | новый       | 1906,3                   | 1910,8 | 1926,2 | 1936,6 | 1891,7 | 1912,2 | 1899,5  | 1925,4 | 1923,5  | 1904,7 | 1937,1  | 1896,7 | 1910,7  | 1906,4 | 1928,3  | 1900,8 | 1926,9  | 1910,4 | 1907,7  | 1895,6 |
| 7,6         | без         | 1535,0                   | 1506,7 | 1500,7 | 1523,2 | 1514,4 | 1521,5 | 1508,4  | 1530,7 | 1530,3  | 1511,2 | 1510,2  | 1506,7 | 1520,5  | 1532,0 | 1527,7  | 1535,1 | 1503,9  | 1521,0 | 1530,4  | 1542,5 |
|             | класси.     | 1754,1                   | 1753,2 | 1783,2 | 1780,9 | 1763,6 | 1779,2 | 1770,9  | 1773,0 | 1769,8  | 1779,5 | 1783,4  | 1761,3 | 1755,5  | 1764,1 | 1741,4  | 1767,6 | 1747,5  | 1778,1 | 1737,5  | 1739,3 |
|             | новый       | 1897,3                   | 1904,4 | 1915,2 | 1903,5 | 1905,2 | 1923,2 | 1923,9  | 1925,3 | 1929,1  | 1914,9 | 1933,7  | 1899,4 | 1897,8  | 1923,3 | 1913,2  | 1942,9 | 1906,3  | 1946,1 | 1916,9  | 1903,8 |
| 11,4        | без         | 1441,7                   | 1435,3 | 1452,9 | 1447,5 | 1441,4 | 1447,7 | 1459,0  | 1430,6 | 1419,3  | 1439,8 | 1436,2  | 1427,5 | 1435,1  | 1430,7 | 1430,9  | 1428,2 | 1431,9  | 1440,0 | 1439,1  | 1431,3 |
|             | класси.     | 1705,8                   | 1707,9 | 1697,2 | 1703,5 | 1683,9 | 1716,7 | 1711,5  | 1675,8 | 1713,9  | 1706,7 | 1705,9  | 1708,6 | 1675,0  | 1678,2 | 1706,0  | 1725,2 | 1709,2  | 1716,6 | 1699,5  | 1695,2 |
|             | новый       | 1879,4                   | 1892,1 | 1863,4 | 1896,6 | 1873,7 | 1864,7 | 1907,8  | 1895,1 | 1863,3  | 1880,8 | 1872,6  | 1891,5 | 1883,5  | 1879,0 | 1874,3  | 1890,4 | 1902,2  | 1905,7 | 1897,0  | 1889,5 |
| 15,2        | без         | 1384,1                   | 1381,5 | 1410,8 | 1387,8 | 1412,1 | 1389,2 | 1416,5  | 1399,9 | 1392,6  | 1409,2 | 1412,7  | 1404,1 | 1398,3  | 1407,6 | 1407,8  | 1379,7 | 1381,1  | 1382,5 | 1413,3  | 1389,0 |
|             | класси.     | 1681,7                   | 1681,4 | 1661,7 | 1656,1 | 1682,8 | 1649,1 | 1667,0  | 1672,7 | 1637,6  | 1667,9 | 1665,8  | 1677,6 | 1670,4  | 1635,7 | 1643,6  | 1653,4 | 1641,7  | 1671,0 | 1664,7  | 1663,7 |
|             | новый       | 1825,6                   | 1850,1 | 1826,1 | 1843,8 | 1838,5 | 1856,5 | 1827,1  | 1857,6 | 1856,5  | 1845,2 | 1822,9  | 1852,4 | 1834,6  | 1822,7 | 1840,2  | 1835,4 | 1861,4  | 1842,9 | 1838,8  | 1859,7 |
| 19,0        | без         | 1347,3                   | 1347,4 | 1341,1 | 1350,1 | 1355,1 | 1320,7 | 1335,8  | 1349,3 | 1349,2  | 1324,1 | 1322,9  | 1345,1 | 1352,5  | 1326,0 | 1321,3  | 1360,0 | 1325,5  | 1322,6 | 1340,4  | 1334,0 |
|             | класси.     | 1599,7                   | 1613,5 | 1581,0 | 1583,9 | 1597,1 | 1606,7 | 1578,5  | 1620,9 | 1580,4  | 1596,6 | 1577,2  | 1612,5 | 1618,4  | 1588,1 | 1615,6  | 1613,0 | 1613,6  | 1618,9 | 1584,1  | 1591,5 |
|             | новый       | 1825,0                   | 1806,0 | 1796,7 | 1793,5 | 1816,7 | 1796,3 | 1815,7  | 1808,5 | 1797,0  | 1795,6 | 1832,9  | 1801,5 | 1816,2  | 1846,3 | 1819,6  | 1819,7 | 1795,8  | 1804,3 | 1807,1  | 1838,5 |

| Расход, л/с | Конструкция | Средняя мутность | ХПК на выходе в 30мин, мг/л | БПК <sub>5</sub> на выходе в 30мин, мг/л | Средняя погрешность для результатов, % |
|-------------|-------------|------------------|-----------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| 3,8         | без         | 1700,8           | 474                         | 237                                      | 0,41%                                  |
|             | класси.     | 1903,8           | 158                         | 79                                       | 0,45%                                  |
|             | новый       | 1912,9           | 127                         | 63                                       | 0,34%                                  |
| 7,6         | без         | 1520,6           | 759                         | 380                                      | 0,38%                                  |
|             | класси.     | 1764,2           | 380                         | 190                                      | 0,40%                                  |
|             | новый       | 1916,3           | 127                         | 63                                       | 0,36%                                  |
| 11,4        | без         | 1437,3           | 886                         | 443                                      | 0,31%                                  |
|             | класси.     | 1702,1           | 474                         | 237                                      | 0,39%                                  |
|             | новый       | 1885,1           | 190                         | 95                                       | 0,35%                                  |
| 15,2        | без         | 1398,0           | 949                         | 474                                      | 0,44%                                  |
|             | класси.     | 1662,3           | 538                         | 269                                      | 0,42%                                  |
|             | новый       | 1841,9           | 253                         | 127                                      | 0,33%                                  |
| 19,0        | без         | 1338,5           | 1044                        | 522                                      | 0,46%                                  |
|             | класси.     | 1599,6           | 633                         | 316                                      | 0,46%                                  |
|             | новый       | 1811,6           | 285                         | 142                                      | 0,40%                                  |

2. Концентрация входящих взвешенных веществ,3000 мг/л, ХПК 4087мг/л, БПК<sub>5</sub> 2044мг/л.

| Расход, л/с | Конструкция | Мутность по времени, NTU |        |        |        |        |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |
|-------------|-------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
|             |             | 1,5мин                   | 3мин   | 4,5мин | 6мин   | 7,5мин | 9мин   | 10,5мин | 12мин  | 13,5мин | 15мин  | 16,5мин | 18мин  | 19,5мин | 21мин  | 22,5мин | 24мин  | 25,5мин | 27мин  | 28,5мин | 30мин  |
| 3,8         | без         | 2197,5                   | 2205,9 | 2215,4 | 2236,0 | 2189,9 | 2251,8 | 2232,1  | 2231,6 | 2252,5  | 2226,8 | 2229,2  | 2200,9 | 2204,4  | 2231,1 | 2207,7  | 2204,8 | 2206,5  | 2204,5 | 2247,6  | 2195,8 |
|             | класси.     | 2422,9                   | 2421,4 | 2398,7 | 2401,7 | 2421,4 | 2411,8 | 2464,0  | 2415,4 | 2398,5  | 2445,9 | 2455,7  | 2411,2 | 2396,9  | 2433,6 | 2438,5  | 2424,9 | 2429,5  | 2408,0 | 2455,9  | 2405,4 |
|             | новый       | 2894,9                   | 2897,1 | 2868,6 | 2908,5 | 2881,9 | 2897,2 | 2902,2  | 2901,9 | 2839,8  | 2906,2 | 2863,8  | 2867,3 | 2888,7  | 2895,8 | 2882,2  | 2879,8 | 2886,9  | 2838,5 | 2892,4  | 2839,3 |
| 7,6         | без         | 2115,2                   | 2098,6 | 2116,1 | 2106,9 | 2109,6 | 2140,1 | 2119,7  | 2107,3 | 2133,5  | 2131,7 | 2133,1  | 2127,8 | 2127,0  | 2130,6 | 2144,3  | 2133,8 | 2141,8  | 2099,9 | 2128,7  | 2155,2 |
|             | класси.     | 2315,8                   | 2307,7 | 2329,1 | 2327,2 | 2346,5 | 2318,7 | 2357,8  | 2327,0 | 2325,4  | 2322,9 | 2332,3  | 2363,6 | 2344,9  | 2341,8 | 2348,7  | 2317,7 | 2343,2  | 2367,7 | 2341,0  | 2313,3 |
|             | новый       | 2854,2                   | 2810,1 | 2806,5 | 2856,6 | 2783,2 | 2851,9 | 2822,2  | 2827,3 | 2784,2  | 2817,7 | 2809,0  | 2801,2 | 2861,9  | 2785,0 | 2851,3  | 2788,4 | 2790,5  | 2801,9 | 2808,8  | 2821,2 |
| 11,4        | без         | 2076,4                   | 2099,2 | 2094,0 | 2050,3 | 2054,3 | 2094,1 | 2065,2  | 2076,9 | 2053,9  | 2094,4 | 2097,6  | 2074,9 | 2084,6  | 2082,7 | 2041,7  | 2049,0 | 2097,3  | 2066,8 | 2065,9  | 2100,2 |
|             | класси.     | 2384,4                   | 2371,9 | 2408,9 | 2425,9 | 2390,3 | 2406,6 | 2385,2  | 2395,4 | 2370,4  | 2389,0 | 2411,8  | 2405,2 | 2378,0  | 2396,4 | 2369,6  | 2434,8 | 2377,9  | 2401,4 | 2380,0  | 2377,1 |
|             | новый       | 2815,9                   | 2763,7 | 2827,5 | 2811,5 | 2782,6 | 2778,2 | 2777,1  | 2753,3 | 2772,1  | 2757,5 | 2829,5  | 2802,8 | 2801,6  | 2811,7 | 2762,0  | 2771,0 | 2787,0  | 2806,0 | 2807,4  | 2804,1 |
| 15,2        | без         | 1989,7                   | 1998,8 | 1991,3 | 2005,7 | 1954,9 | 1970,1 | 1962,7  | 1973,6 | 1973,4  | 2009,5 | 1963,5  | 1997,1 | 2009,4  | 1964,2 | 1995,2  | 1981,1 | 1969,1  | 1967,3 | 1977,6  | 2009,2 |
|             | класси.     | 2343,6                   | 2306,7 | 2319,5 | 2309,4 | 2345,1 | 2338,2 | 2346,4  | 2352,6 | 2310,7  | 2351,3 | 2324,0  | 2320,5 | 2345,9  | 2342,3 | 2325,6  | 2347,2 | 2368,4  | 2328,8 | 2351,9  | 2324,4 |
|             | новый       | 2700,5                   | 2730,9 | 2700,1 | 2707,1 | 2738,3 | 2770,7 | 2760,5  | 2736,1 | 2697,1  | 2708,2 | 2746,6  | 2737,1 | 2713,6  | 2734,7 | 2697,0  | 2734,4 | 2762,0  | 2708,6 | 2707,8  | 2752,1 |
| 19,0        | без         | 1946,3                   | 1955,5 | 1927,9 | 1968,3 | 1925,4 | 1925,7 | 1944,7  | 1977,7 | 1927,9  | 1935,2 | 1936,5  | 1932,5 | 1921,3  | 1926,8 | 1925,9  | 1921,6 | 1923,1  | 1962,7 | 1973,7  | 1933,5 |
|             | класси.     | 2250,6                   | 2272,2 | 2250,8 | 2278,9 | 2263,7 | 2290,3 | 2253,5  | 2283,3 | 2291,0  | 2269,6 | 2287,7  | 2269,2 | 2276,2  | 2279,3 | 2257,5  | 2280,2 | 2277,1  | 2252,6 | 2280,9  | 2280,0 |
|             | новый       | 2683,6                   | 2671,4 | 2673,6 | 2633,4 | 2658,7 | 2695,8 | 2639,2  | 2682,1 | 2675,7  | 2638,5 | 2709,3  | 2678,3 | 2668,4  | 2703,2 | 2671,4  | 2635,9 | 2682,0  | 2645,4 | 2667,1  | 2684,7 |

| Расход, л/с | Конструкция | Средняя мутность | ХПК на выходе в 30мин, мг/л | БПК <sub>5</sub> на выходе в 30мин, мг/л | Средняя погрешность для результатов, % |
|-------------|-------------|------------------|-----------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| 3,8         | без         | 2218,6           | 1063                        | 531                                      | 0,42%                                  |
|             | класси.     | 2423,1           | 777                         | 388                                      | 0,40%                                  |
|             | новый       | 2881,7           | 163                         | 82                                       | 0,36%                                  |
| 7,6         | без         | 2125,0           | 1185                        | 593                                      | 0,34%                                  |
|             | класси.     | 2334,6           | 899                         | 450                                      | 0,35%                                  |
|             | новый       | 2816,7           | 245                         | 123                                      | 0,44%                                  |
| 11,4        | без         | 2076,0           | 1267                        | 633                                      | 0,44%                                  |
|             | класси.     | 2393,0           | 817                         | 409                                      | 0,36%                                  |
|             | новый       | 2791,1           | 286                         | 143                                      | 0,40%                                  |
| 15,2        | без         | 1983,2           | 1390                        | 695                                      | 0,43%                                  |
|             | класси.     | 2335,1           | 899                         | 450                                      | 0,34%                                  |
|             | новый       | 2727,2           | 368                         | 184                                      | 0,41%                                  |
| 19,0        | без         | 1939,6           | 1430                        | 715                                      | 0,45%                                  |
|             | класси.     | 2272,2           | 981                         | 490                                      | 0,28%                                  |
|             | новый       | 2669,9           | 450                         | 225                                      | 0,39%                                  |

### 3. Концентрация входящих взвешенных веществ, 4000 мг/л, ХПК 5058 мг/л, БПК<sub>5</sub> 2530 мг/л.

| Расход, л/с | Конструкция | Мутность по времени, NTU |        |        |        |        |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |
|-------------|-------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
|             |             | 1,5мин                   | 3мин   | 4,5мин | 6мин   | 7,5мин | 9мин   | 10,5мин | 12мин  | 13,5мин | 15мин  | 16,5мин | 18мин  | 19,5мин | 21мин  | 22,5мин | 24мин  | 25,5мин | 27мин  | 28,5мин | 30мин  |
| 3,8         | без         | 2783,3                   | 2748,3 | 2781,3 | 2727,4 | 2774,5 | 2753,5 | 2746,2  | 2794,8 | 2746,9  | 2772,5 | 2730,5  | 2798,2 | 2749,6  | 2750,0 | 2784,4  | 2788,0 | 2745,1  | 2731,9 | 2787,0  | 2786,7 |
|             | класси.     | 3335,5                   | 3331,1 | 3377,2 | 3349,3 | 3402,7 | 3383,5 | 3320,4  | 3369,8 | 3333,9  | 3369,9 | 3330,4  | 3337,6 | 3379,9  | 3378,8 | 3364,8  | 3370,3 | 3312,3  | 3331,5 | 3408,2  | 3384,3 |
|             | новый       | 3814,2                   | 3757,9 | 3773,4 | 3713,2 | 3762,4 | 3763,7 | 3785,8  | 3705,1 | 3787,8  | 3793,2 | 3768,5  | 3758,5 | 3719,2  | 3751,1 | 3764,8  | 3715,0 | 3729,8  | 3718,9 | 3707,9  | 3745,2 |
| 7,6         | без         | 2560,2                   | 2523,6 | 2542,2 | 2523,2 | 2529,8 | 2571,1 | 2559,2  | 2540,3 | 2555,8  | 2524,6 | 2585,8  | 2539,7 | 2552,8  | 2522,7 | 2529,5  | 2541,0 | 2566,5  | 2577,0 | 2565,3  | 2538,6 |
|             | класси.     | 3131,9                   | 3184,7 | 3162,0 | 3113,2 | 3184,4 | 3151,3 | 3167,8  | 3113,2 | 3205,8  | 3165,8 | 3201,5  | 3163,5 | 3200,9  | 3132,4 | 3192,4  | 3156,9 | 3143,0  | 3122,3 | 3113,6  | 3169,0 |
|             | новый       | 3607,5                   | 3623,7 | 3602,1 | 3675,2 | 3625,1 | 3606,6 | 3668,0  | 3634,1 | 3662,3  | 3636,9 | 3606,5  | 3684,8 | 3677,6  | 3649,2 | 3635,8  | 3617,4 | 3683,8  | 3605,5 | 3691,5  | 3602,0 |
| 11,4        | без         | 2528,7                   | 2546,4 | 2553,4 | 2494,1 | 2502,8 | 2498,7 | 2545,0  | 2498,9 | 2544,0  | 2493,6 | 2516,8  | 2517,5 | 2488,7  | 2512,5 | 2536,3  | 2526,1 | 2545,8  | 2533,4 | 2530,6  | 2512,0 |
|             | класси.     | 2995,0                   | 3014,3 | 3014,5 | 3068,8 | 3061,2 | 3061,9 | 3050,7  | 3004,3 | 3029,1  | 3019,1 | 3018,8  | 3059,0 | 3049,6  | 3024,8 | 3010,9  | 3047,6 | 3046,8  | 3065,0 | 3057,7  | 3067,9 |
|             | новый       | 3570,2                   | 3549,2 | 3650,5 | 3571,4 | 3579,1 | 3602,9 | 3578,0  | 3549,2 | 3628,9  | 3593,8 | 3571,8  | 3618,9 | 3611,6  | 3617,5 | 3579,8  | 3560,9 | 3601,7  | 3629,5 | 3639,3  | 3613,2 |
| 15,2        | без         | 2444,0                   | 2441,6 | 2439,7 | 2452,8 | 2433,2 | 2436,5 | 2423,4  | 2433,9 | 2457,9  | 2443,6 | 2458,4  | 2440,1 | 2472,5  | 2415,2 | 2454,8  | 2460,3 | 2469,5  | 2423,2 | 2423,8  | 2406,9 |
|             | класси.     | 2907,6                   | 2880,1 | 2905,7 | 2851,0 | 2874,6 | 2913,5 | 2871,3  | 2902,0 | 2863,0  | 2893,6 | 2914,1  | 2860,2 | 2866,8  | 2837,4 | 2869,0  | 2879,2 | 2857,0  | 2856,8 | 2919,3  | 2897,2 |
|             | новый       | 3522,3                   | 3576,2 | 3562,3 | 3608,1 | 3557,1 | 3611,2 | 3506,8  | 3603,4 | 3543,6  | 3532,3 | 3571,0  | 3578,7 | 3521,4  | 3527,3 | 3562,5  | 3544,7 | 3590,9  | 3601,4 | 3525,8  | 3536,6 |
| 19,0        | без         | 2347,2                   | 2353,0 | 2391,1 | 2391,5 | 2333,1 | 2348,9 | 2388,9  | 2336,7 | 2380,4  | 2387,9 | 2382,7  | 2386,6 | 2378,7  | 2382,0 | 2342,4  | 2348,2 | 2344,7  | 2357,8 | 2345,9  | 2392,9 |
|             | класси.     | 2727,0                   | 2785,9 | 2760,5 | 2728,3 | 2796,3 | 2738,3 | 2758,2  | 2771,4 | 2760,2  | 2796,5 | 2763,7  | 2725,5 | 2739,4  | 2768,3 | 2739,0  | 2787,5 | 2755,1  | 2770,9 | 2798,3  | 2739,5 |
|             | новый       | 3488,9                   | 3568,1 | 3483,5 | 3552,3 | 3493,3 | 3530,1 | 3529,5  | 3548,9 | 3486,4  | 3522,6 | 3542,1  | 3500,1 | 3479,2  | 3512,8 | 3517,6  | 3535,3 | 3483,2  | 3520,1 | 3497,8  | 3514,0 |

| Расход, л/с | Конструкция | Средняя мутность | ХПК на выходе в 30мин, мг/л | БПК <sub>5</sub> на выходе в 30мин, мг/л | Средняя погрешность для результатов, % |
|-------------|-------------|------------------|-----------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| 3,8         | без         | 2764,0           | 1568                        | 784                                      | 0,40%                                  |
|             | класси.     | 3358,6           | 809                         | 405                                      | 0,40%                                  |
|             | новый       | 3751,8           | 303                         | 152                                      | 0,40%                                  |
| 7,6         | без         | 2547,4           | 1821                        | 910                                      | 0,36%                                  |
|             | класси.     | 3158,8           | 1062                        | 531                                      | 0,46%                                  |
|             | новый       | 3639,8           | 455                         | 228                                      | 0,41%                                  |
| 11,4        | без         | 2521,3           | 1871                        | 936                                      | 0,39%                                  |
|             | класси.     | 3038,4           | 1214                        | 607                                      | 0,37%                                  |
|             | новый       | 3595,9           | 506                         | 253                                      | 0,39%                                  |
| 15,2        | без         | 2441,6           | 1973                        | 986                                      | 0,34%                                  |
|             | класси.     | 2881,0           | 1416                        | 708                                      | 0,40%                                  |
|             | новый       | 3559,2           | 556                         | 278                                      | 0,43%                                  |
| 19,0        | без         | 2366,0           | 2074                        | 1037                                     | 0,43%                                  |
|             | класси.     | 2760,5           | 1568                        | 784                                      | 0,41%                                  |
|             | новый       | 3515,3           | 607                         | 303                                      | 0,35%                                  |

4. Концентрация входящих взвешенных веществ, 5000 мг/л, ХПК 6086мг/л, БПК<sub>5</sub> 3043мг/л.

| Расход, л/с | Конструкция | Мутность по времени, NTU |        |        |        |        |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |
|-------------|-------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
|             |             | 1,5мин                   | 3мин   | 4,5мин | 6мин   | 7,5мин | 9мин   | 10,5мин | 12мин  | 13,5мин | 15мин  | 16,5мин | 18мин  | 19,5мин | 21мин  | 22,5мин | 24мин  | 25,5мин | 27мин  | 28,5мин | 30мин  |
| 3,8         | без         | 3288,4                   | 3260,0 | 3261,9 | 3322,6 | 3258,8 | 3330,7 | 3325,3  | 3272,2 | 3282,3  | 3295,1 | 3324,6  | 3327,1 | 3270,1  | 3251,1 | 3317,5  | 3266,9 | 3324,4  | 3327,5 | 3297,4  | 3257,7 |
|             | класси.     | 4071,1                   | 3999,6 | 4034,0 | 3989,6 | 4046,2 | 4035,9 | 4021,6  | 4091,2 | 4011,2  | 4084,8 | 4064,6  | 4029,7 | 4049,8  | 4028,4 | 4038,7  | 4017,9 | 4025,8  | 4069,0 | 4061,8  | 4068,1 |
|             | новый       | 4622,3                   | 4578,0 | 4613,5 | 4562,4 | 4657,1 | 4536,0 | 4599,4  | 4605,9 | 4598,3  | 4613,8 | 4565,5  | 4550,9 | 4579,6  | 4551,6 | 4569,2  | 4650,8 | 4550,1  | 4605,3 | 4543,3  | 4587,8 |
| 7,6         | без         | 3110,0                   | 3137,1 | 3105,7 | 3094,4 | 3087,1 | 3129,3 | 3103,9  | 3059,9 | 3095,0  | 3101,4 | 3058,5  | 3105,5 | 3075,8  | 3059,8 | 3100,8  | 3102,0 | 3107,5  | 3095,3 | 3092,5  | 3114,8 |
|             | класси.     | 3853,8                   | 3901,3 | 3847,3 | 3851,4 | 3941,6 | 3868,7 | 3888,5  | 3870,8 | 3949,3  | 3947,5 | 3876,1  | 3870,8 | 3929,8  | 3891,4 | 3919,7  | 3942,4 | 3871,3  | 3879,7 | 3884,2  | 3866,0 |
|             | новый       | 4524,6                   | 4493,4 | 4537,9 | 4582,5 | 4499,2 | 4615,0 | 4522,0  | 4570,0 | 4588,0  | 4524,7 | 4482,3  | 4581,9 | 4606,6  | 4486,5 | 4616,5  | 4563,2 | 4535,4  | 4519,4 | 4493,0  | 4544,4 |
| 11,4        | без         | 2892,6                   | 2925,5 | 2913,7 | 2902,9 | 2925,3 | 2901,1 | 2870,7  | 2908,7 | 2930,4  | 2901,6 | 2936,9  | 2881,4 | 2927,9  | 2940,0 | 2907,8  | 2872,9 | 2900,7  | 2927,1 | 2887,6  | 2913,2 |
|             | класси.     | 3655,4                   | 3693,5 | 3602,2 | 3600,2 | 3651,5 | 3607,0 | 3633,9  | 3608,2 | 3668,6  | 3646,8 | 3682,8  | 3605,2 | 3689,7  | 3681,5 | 3609,9  | 3640,7 | 3700,4  | 3702,2 | 3652,1  | 3667,7 |
|             | новый       | 4462,9                   | 4467,7 | 4542,3 | 4437,1 | 4514,8 | 4440,7 | 4537,4  | 4490,5 | 4472,9  | 4458,0 | 4478,0  | 4449,6 | 4484,1  | 4499,5 | 4464,5  | 4447,4 | 4442,9  | 4550,9 | 4437,6  | 4486,0 |
| 15,2        | без         | 2827,8                   | 2863,3 | 2830,4 | 2828,6 | 2828,9 | 2812,8 | 2837,6  | 2846,3 | 2808,9  | 2841,8 | 2866,5  | 2840,1 | 2891,2  | 2877,0 | 2838,5  | 2862,8 | 2810,0  | 2821,2 | 2854,8  | 2858,5 |
|             | класси.     | 3498,4                   | 3550,5 | 3470,8 | 3549,5 | 3536,6 | 3471,6 | 3473,0  | 3474,2 | 3477,8  | 3535,0 | 3550,1  | 3552,0 | 3507,8  | 3542,7 | 3467,7  | 3465,9 | 3478,4  | 3499,5 | 3532,1  | 3461,8 |
|             | новый       | 4417,9                   | 4392,7 | 4392,5 | 4385,0 | 4409,6 | 4347,0 | 4447,5  | 4374,6 | 4389,0  | 4351,8 | 4369,3  | 4397,8 | 4350,1  | 4414,3 | 4378,1  | 4364,4 | 4425,4  | 4402,9 | 4431,2  | 4423,1 |
| 19,0        | без         | 2711,4                   | 2678,6 | 2668,6 | 2699,2 | 2702,9 | 2736,3 | 2674,8  | 2721,2 | 2708,7  | 2717,1 | 2707,8  | 2684,0 | 2664,7  | 2735,3 | 2681,8  | 2703,7 | 2733,3  | 2735,0 | 2685,3  | 2721,1 |
|             | класси.     | 3321,6                   | 3328,3 | 3332,8 | 3347,8 | 3398,3 | 3299,8 | 3327,7  | 3382,4 | 3385,0  | 3398,4 | 3389,3  | 3380,9 | 3326,1  | 3319,8 | 3396,1  | 3304,3 | 3366,1  | 3334,3 | 3354,6  | 3349,4 |
|             | новый       | 4294,7                   | 4391,9 | 4334,0 | 4342,8 | 4299,2 | 4303,3 | 4341,7  | 4362,5 | 4318,2  | 4366,0 | 4326,0  | 4384,1 | 4312,6  | 4336,8 | 4332,1  | 4328,8 | 4323,6  | 4364,4 | 4303,9  | 4333,4 |

| Расход, л/с | Конструкция | Средняя мутность | ХПК на выходе в 30мин, мг/л | БПК <sub>5</sub> на выходе в 30мин, мг/л | Средняя погрешность для результатов, % |
|-------------|-------------|------------------|-----------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| 3,8         | без         | 3293,1           | 2069                        | 1035                                     | 0,42%                                  |
|             | класси.     | 4042,0           | 1156                        | 578                                      | 0,33%                                  |
|             | новый       | 4587,0           | 487                         | 243                                      | 0,36%                                  |
| 7,6         | без         | 3096,8           | 2313                        | 1156                                     | 0,32%                                  |
|             | класси.     | 3892,6           | 1339                        | 669                                      | 0,41%                                  |
|             | новый       | 4544,3           | 548                         | 274                                      | 0,46%                                  |
| 11,4        | без         | 2908,4           | 2556                        | 1278                                     | 0,33%                                  |
|             | класси.     | 3650,0           | 1643                        | 822                                      | 0,46%                                  |
|             | новый       | 4478,2           | 609                         | 304                                      | 0,37%                                  |
| 15,2        | без         | 2842,4           | 2617                        | 1308                                     | 0,38%                                  |
|             | класси.     | 3504,8           | 1826                        | 913                                      | 0,47%                                  |
|             | новый       | 4393,2           | 730                         | 365                                      | 0,31%                                  |
| 19,0        | без         | 2703,5           | 2800                        | 1400                                     | 0,41%                                  |
|             | класси.     | 3352,2           | 2008                        | 1004                                     | 0,46%                                  |
|             | новый       | 4335,0           | 791                         | 396                                      | 0,30%                                  |

5. Концентрация входящих взвешенных веществ, 6000 мг/л, ХПК 6878мг/л, БПК<sub>5</sub> 3439мг/л.

| Расход, л/с | Конструкция | Мутность по времени, NTU |        |        |        |        |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |         |        |
|-------------|-------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
|             |             | 1,5мин                   | 3мин   | 4,5мин | 6мин   | 7,5мин | 9мин   | 10,5мин | 12мин  | 13,5мин | 15мин  | 16,5мин | 18мин  | 19,5мин | 21мин  | 22,5мин | 24мин  | 25,5мин | 27мин  | 28,5мин | 30мин  |
| 3,8         | без         | 3697,8                   | 3766,1 | 3746,5 | 3686,2 | 3762,8 | 3769,6 | 3707,4  | 3760,0 | 3675,0  | 3771,5 | 3768,6  | 3762,8 | 3754,3  | 3752,7 | 3745,5  | 3720,8 | 3711,6  | 3766,3 | 3685,9  | 3719,0 |
|             | класси.     | 4413,2                   | 4478,2 | 4471,5 | 4463,7 | 4407,5 | 4501,9 | 4468,0  | 4389,9 | 4493,3  | 4483,4 | 4445,5  | 4407,0 | 4392,0  | 4449,6 | 4384,0  | 4402,3 | 4476,3  | 4450,7 | 4464,4  | 4440,8 |
|             | новый       | 5387,4                   | 5383,2 | 5456,3 | 5525,4 | 5442,2 | 5516,3 | 5444,4  | 5467,8 | 5485,4  | 5499,3 | 5452,5  | 5440,0 | 5399,9  | 5471,2 | 5540,3  | 5499,5 | 5486,8  | 5533,8 | 5461,5  | 5426,6 |
| 7,6         | без         | 3573,5                   | 3604,8 | 3615,6 | 3606,1 | 3650,7 | 3559,8 | 3597,7  | 3593,6 | 3621,8  | 3615,5 | 3563,5  | 3653,8 | 3610,1  | 3573,5 | 3562,1  | 3649,2 | 3578,6  | 3632,4 | 3547,0  | 3551,3 |
|             | класси.     | 4325,3                   | 4304,2 | 4358,7 | 4323,5 | 4341,8 | 4342,8 | 4330,7  | 4263,2 | 4261,1  | 4320,8 | 4363,2  | 4352,8 | 4321,2  | 4345,4 | 4275,7  | 4354,3 | 4265,0  | 4379,6 | 4370,7  | 4258,3 |
|             | новый       | 5331,1                   | 5455,4 | 5338,0 | 5342,8 | 5459,6 | 5379,3 | 5467,4  | 5358,6 | 5323,7  | 5451,4 | 5480,3  | 5445,5 | 5448,4  | 5417,2 | 5399,5  | 5399,4 | 5399,9  | 5399,9 | 5323,5  | 5346,6 |
| 11,4        | без         | 3490,6                   | 3522,6 | 3481,2 | 3481,2 | 3482,7 | 3517,1 | 3450,8  | 3492,2 | 3510,7  | 3459,5 | 3515,2  | 3493,1 | 3513,6  | 3432,3 | 3457,1  | 3492,4 | 3433,3  | 3478,5 | 3446,8  | 3428,3 |
|             | класси.     | 4193,4                   | 4152,9 | 4164,0 | 4100,5 | 4141,8 | 4117,1 | 4181,8  | 4170,0 | 4117,6  | 4164,0 | 4156,5  | 4119,3 | 4080,3  | 4108,9 | 4156,0  | 4113,1 | 4106,1  | 4093,7 | 4196,6  | 4099,6 |
|             | новый       | 5357,1                   | 5406,6 | 5412,3 | 5265,7 | 5392,1 | 5384,2 | 5383,7  | 5324,3 | 5373,5  | 5280,4 | 5405,4  | 5386,0 | 5373,2  | 5328,4 | 5408,3  | 5324,8 | 5374,5  | 5419,5 | 5359,0  | 5327,4 |
| 15,2        | без         | 3370,6                   | 3399,6 | 3394,9 | 3367,2 | 3360,0 | 3340,8 | 3343,3  | 3387,7 | 3336,7  | 3364,2 | 3401,1  | 3341,9 | 3311,3  | 3368,2 | 3310,5  | 3391,3 | 3349,1  | 3387,0 | 3388,2  | 3383,9 |
|             | класси.     | 3928,2                   | 3912,1 | 3949,6 | 3963,2 | 3987,7 | 3941,8 | 3939,0  | 3935,6 | 3995,2  | 4004,3 | 3955,9  | 3959,7 | 3935,5  | 4002,9 | 4011,9  | 4001,2 | 3925,2  | 3941,8 | 3967,8  | 3977,0 |
|             | новый       | 5289,7                   | 5354,4 | 5243,0 | 5212,9 | 5320,6 | 5247,7 | 5339,3  | 5212,6 | 5229,4  | 5289,0 | 5281,9  | 5345,0 | 5267,8  | 5287,3 | 5300,1  | 5350,5 | 5281,9  | 5282,5 | 5343,2  | 5354,7 |
| 19,0        | без         | 3193,9                   | 3223,1 | 3194,9 | 3196,2 | 3245,7 | 3232,8 | 3263,1  | 3270,9 | 3241,1  | 3280,5 | 3205,3  | 3213,1 | 3253,0  | 3282,8 | 3205,0  | 3284,7 | 3210,9  | 3258,4 | 3222,4  | 3275,9 |
|             | класси.     | 3897,0                   | 3802,3 | 3798,1 | 3879,4 | 3812,5 | 3831,9 | 3840,6  | 3813,9 | 3805,9  | 3839,7 | 3886,4  | 3823,7 | 3849,7  | 3799,6 | 3798,1  | 3792,4 | 3828,0  | 3867,5 | 3893,4  | 3861,9 |
|             | новый       | 5025,2                   | 5143,2 | 5028,3 | 5142,1 | 5062,8 | 5080,2 | 5038,7  | 5124,3 | 5067,8  | 5062,4 | 5089,9  | 5131,4 | 5114,4  | 5052,7 | 5089,3  | 5121,9 | 5129,0  | 5122,9 | 5059,2  | 5035,3 |

| Расход, л/с | Конструкция | Средняя мутность | ХПК на выходе в 30мин, мг/л | БПК <sub>5</sub> на выходе в 30мин, мг/л | Средняя погрешность для результатов, % |
|-------------|-------------|------------------|-----------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| 3,8         | без         | 3736,5           | 2614                        | 1307                                     | 0,41%                                  |
|             | класси.     | 4444,2           | 1788                        | 894                                      | 0,40%                                  |
|             | новый       | 5466,0           | 619                         | 310                                      | 0,40%                                  |
| 7,6         | без         | 3598,0           | 2751                        | 1376                                     | 0,44%                                  |
|             | класси.     | 4322,9           | 1926                        | 963                                      | 0,43%                                  |
|             | новый       | 5398,4           | 688                         | 344                                      | 0,47%                                  |
| 11,4        | без         | 3479,0           | 2889                        | 1444                                     | 0,41%                                  |
|             | класси.     | 4136,7           | 2132                        | 1066                                     | 0,40%                                  |
|             | новый       | 5364,3           | 757                         | 378                                      | 0,38%                                  |
| 15,2        | без         | 3364,9           | 3026                        | 1513                                     | 0,39%                                  |
|             | класси.     | 3961,8           | 2339                        | 1169                                     | 0,36%                                  |
|             | новый       | 5291,7           | 825                         | 413                                      | 0,42%                                  |
| 19,0        | без         | 3237,7           | 3164                        | 1582                                     | 0,47%                                  |
|             | класси.     | 3836,1           | 2476                        | 1238                                     | 0,43%                                  |
|             | новый       | 5086,1           | 1032                        | 516                                      | 0,37%                                  |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

«Китайская шестая металлургическая строительная компания, ООО»



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом подтверждается, что по поручению аспиранта Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Юй Шуайсянь была проведена оценка практического применения результатов его диссертационного исследования «Разработка тонкослойного модуля с применением эффекта эжектирования взвешенных частиц для повышения эффективности очистки сточных вод». Внедрение осуществлялось на проектной площадке второй очереди строительства (филиал «Гуанси Хуашэн») компании «Китайская шестая металлургическая строительная компания, ООО» (China Sixth Metallurgical Construction Co., Ltd.).

С целью проверки практической применимости и надежности указанного отстойника и тонкослойных модулей наша компания применила их в реальном технологическом процессе осаждения сточных вод и провела серию эксплуатационных испытаний.

В процессе практического применения новый тип тонкослойного отстойника продемонстрировал следующие значительные преимущества:

- Значительно снижен риск всплывания активного ила и засорения тонкослойных модулей. Данные фактической эксплуатации свидетельствуют о том, что эффективность осаждения взвешенных веществ в сточных водах превосходит требования действующих строительных норм и правил проектирования, а также нормативов по охране окружающей среды;
- Конструктивные особенности нового типа тонкослойных модулей обеспечивают более простое и удобное выполнение операций по ежедневной выгрузке осадка, а также техническому обслуживанию, направленному на предотвращение засорений и очистку системы;
- Благодаря высокой задерживающей способности новых тонкослойных модулей значительно сократилось время, необходимое для осаждения взвешенных веществ в сточных водах, что позволило эффективно снизить общие затраты на систему водоочистки в целом;
- Масштабное применение новых тонкослойных модулей позволит эффективно повысить производительность очистки хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод. Данная технология может быть широко использована как при новом строительстве природоохранных объектов водоподготовки, так и при модернизации существующих сооружений.

Таким образом, результаты оценки нового типа тонкослойного отстойника (объекта исследования Юй Шуайсянь) признаны весьма удовлетворительными. Вместе с тем несмотря на то, что его дальнейшее внедрение в более сложные или сверхкрупные объекты водоподготовки потребует более длительного периода и более систематизированных стандартных испытаний, наша компания полагает, что данный новый тип тонкослойного отстойника уже обладает широким потенциалом для применения в области водоподготовки и строительства систем водоснабжения и водоотведения.

Проектная площадка второй очереди строительства  
«Гуанси Хуашэн» компании «Китайская шестая  
металлургическая строительная компания, ООО»

Менеджер проекта Чжан Вэньбо



01 сентября 2026 г.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ



顺康医药

ООО «Хэнаньская фармацевтическая компания Шунькан»

Henan Shunkang Pharmaceutical Co., Ltd.

«21» 09 2026 г.

## АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы аспиранта кафедры  
«водопользования и экологии» ФГБОУ ВО СПБГАСУ  
Юй Шуайсянь**

Настоящим актом подтверждается, что по поручению аспиранта Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Юй Шуайсянь был проведена оценка практического применения результатов его диссертационного исследования «Разработка тонкослойного модуля с применением эффекта эжектирования взвешенных частиц для повышения эффективности очистки сточных вод». Внедрение осуществлялось в ООО «Хэнаньская фармацевтическая компания Шунькан» (Henan Shunkang Pharmaceutical Co., Ltd.).

Представленный для испытания тонкослойный модуль представлял собой прямоугольную конструкцию, разделенную на отдельные слои (ярусы) наклонными параллельными пластинами. Тонкослойный модуль размещался в емкости отстойника. В каждом ярусе модуля предусматривалось устройство канала движения сточных вод и канала удаления осадка. Данные каналы разделялись между собой перфорированной пластиной. Для удаления воды и осевших частиц из каналов осадка к ним обеспечивалось подключение технологического трубопровода с насосом. Откаченная насосом смесь вновь подавалась в резервуар подачи сточных вод перед отстойником. Локальное очистное сооружение размещалось на выпускном трубопроводе с устройством накопительного резервуара сточных вод с мешалкой (перед отстойником), резервуара чистой воды (после отстойника) и резервуара осадка, из которого вода возвращалась в накопительный резервуар для повторной очистки. Конструкция отстойника предусматривала очистку воды с расходом в диапазоне  $Q = 3,8 \div 19,0$  л/с. Расход увлекаемого потока составлял  $q = 0,01 * Q$  л/с.

При пуске сооружения достигалось установившееся движение сточных вод и фиксировалась концентрация взвеси и ХПК до и после сооружения в соответствующих резервуарах. Движение воды в сооружении обеспечивалось самотеком. Для сравнения эффективности работы тонкослойного с увлекающей способностью проводилась очистка сточной воды с тем же составом с использованием классической конструкции тонкослойного модуля (работающего по противоточной схеме) и отстойника без модуля.

В результате проведенных испытаний установлено:

1. Использование тонкослойных модулей в отстойниках способствует существенному повышению эффективности очистки сточных вод на 31%.
2. Тонкослойный модуль новой конструкции демонстрирует значительные преимущества. Эффективность очистки при его использовании на 14% превышает показатели классического тонкослойного модуля.

Выводы: предложенный тонкослойный модуль с увлекающей способностью взвешенных частиц демонстрирует высокую эффективность осаждения и может быть рекомендован для широкого применения в сфере очистки сточных вод.

Генеральный директор  
ООО «Хэнаньская фармацевтическая  
компания Шунькан»



Чжан Юйсин

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

ПАТЕНТЫ



国家知识产权局

102600

北京市海淀区高里掌路1号院15号楼3层1单元301 北京投知圈知  
识产权代理事务所(普通合伙)  
李瑞(15344340603)

发文日:

2025年03月26日



申请号: 202520545360.3

发文序号: 2025032601355930

专 利 申 请 受 理 通 知 书

根据专利法第28条及其实施细则第43条、第44条的规定,申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日等信息通知如下:

申请号: 2025205453603

申请日: 2025年03月26日

申请人: 禹帅先

发明人: 禹帅先,费奥多罗夫·斯维亚托斯拉夫·维克托罗维奇

发明创造名称: 一种斜板沉淀池结构

经核实,国家知识产权局确认收到文件如下:

权利要求书 1份1页,权利要求项数: 4项

说明书 1份4页

说明书附图 1份4页

说明书摘要 1份1页

专利代理委托书 1份2页

实用新型专利请求书 1份4页

申请方案卷号: 3TZQ-02-2-1377-250326

提示:

1.申请人收到专利申请受理通知书之后,认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时,可以向国家知识产权局请求更正。

2.申请人收到专利申请受理通知书之后,再向国家知识产权局办理各种手续时,均应当准确、清晰地写明申请号。

审 查 员: 自动受理

联系电话: 010-62356655

审查部门: 初审及流程管理部



200101  
2023.03

纸件申请,回函请寄:100088 北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 国家知识产权局专利局受理处收  
电子申请,应当通过专利业务办理系统以电子文件形式提交相关文件。除另有规定外,以纸件等其他形式提交的文件视为未提交。

Перевод с китайского языка на русский язык

## ГОСУДАРСТВЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПО ДЕЛАМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

|                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>102600</b></p> <p>г. Пекин, р-н Хайдянь, ул. Гаолияжан, д. 1, корп. 15, под. 1, эт. 3, оф. 301</p> <p>Пекинское агентство по интеллектуальной собственности «Тоучжицзоань» (полное товарищество)</p> <p>Ли Жуй (15344340603)</p> <p>/Штрих-код/</p> | <p>Дата издания документа:</p> <p><b>26.03.2025 г.</b></p> <p>/Штрих-код/</p> |
| <p>Номер заявки: 202520545360.3</p>                                                                                                                                                                                                                       | <p>Серийный номер документа: 2025032601355930</p>                             |

## УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЁМЕ ПАТЕНТНОЙ ЗАЯВКИ К РАССМОТРЕНИЮ

Патентная заявка, поданная заявителем, принята к рассмотрению Государственным управлением по делам интеллектуальной собственности в соответствии со статьёй 28 Закона о патентах, а также положениями статей 43 и 44 Правил его применения. Номер и дата заявки, а также другие сведения указаны ниже:

Номер заявки: 2025205453603  
 Дата заявки: 26.03.2025 г.  
 Заявитель: Юй Шуайсянь  
 Изобретатель: Юй Шуайсянь, Федоров Святослав Викторович  
 Название изобретения: Конструкция отстойника с тонкослойными модулями  
 Государственное управление по делам интеллектуальной собственности провело проверку и подтверждает получение нижеуказанных документов:  
 Формула изобретения – 1 экземпляр, 1 стр., количество пунктов в формуле: 4  
 Описание – 1 экземпляр, 4 стр.  
 Прилагаемые к описанию чертежи – 1 экземпляр, 4 стр.  
 Реферат описания – 1 экземпляр, 1 стр.  
 Патентная доверенность: 1 экземпляр, 2 стр.  
 Заявление о выдаче патента на полезную модель – 1 экземпляр, 4 стр.  
 Номер дела по заявке: 3TZQ-02-2-1377-250326

## Напоминание:

1. Если заявитель после получения уведомления о приёме патентной заявки к рассмотрению обнаружил несоответствия указанной в уведомлении информации с информацией, которую он предоставлял, он может запросить Государственное управление по делам интеллектуальной собственности внести изменения.
2. После получения уведомления о приёме патентной заявки к рассмотрению заявитель должен точно и ясно указывать номер заявки при обращении в Государственное управление по делам интеллектуальной собственности при проведении любых процедур.

## Печать:

Государственное управление по делам интеллектуальной собственности  
 Специальная печать для операций по проверке  
 1101081359734

Проверяющий отдел: Отдел первичного рассмотрения и управления процессами

Проверяющий: автоматический приём к рассмотрению  
 Контактный телефон: 010-62356655

200101  
 2023.03

При подаче заявки в бумажном виде ответ направлять по адресу получателя: 100088, г. Пекин, р-н Хайдянь, мкр-н Цзимэньцзяо, ул. Ситучэн, д. 6, Служба приёма заявок патентного бюро Государственного управления по правам интеллектуальной собственности. При подаче заявки в электронном виде необходимо предоставить документы в электронном виде через систему оформления патентов. Документы, поданные в бумажном или ином виде, считаются непредоставленными, если иное не предусмотрено правилами.

Я, дипломированный переводчик Завьялова Дарья Андреевна, владеющая русским и китайским языками, подтверждаю, что выполненный мною перевод приложенного документа является правильным, точным и полным.

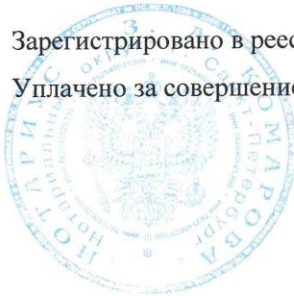
*Завьялова Дарья Андреевна*

Российская Федерация, Санкт-Петербург

Девятого июня две тысячи двадцать шестого года. Я, Миняева Елена Сергеевна, временно исполняющая обязанности нотариуса нотариального округа Санкт-Петербург Комаровой Зои Алексеевны, свидетельствую подлинность подписи переводчика Завьяловой Дарьи Андреевны. Подпись сделана в моем присутствии. Личность подписавшего документ установлена.

Зарегистрировано в реестре: № 78/132-н/78-2026-4-401.

Уплачено за совершение нотариального действия: 800 руб. 00 коп.



*Миняева Е.С.* / Миняева Е.С.



Итого в настоящем документе 2 (два) лист (-а/-ов).

Вр.и.о нотариуса: *Миняева Е.С.* Миняева Е.С.