


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Казанский национальный исследовательский технологический университет»

На правах рукописи



ХАБИБУЛЛИНА АИДА РАМИЛЕВНА

**БИОЛОГИЧЕСКАЯ ДЕФОСФАТАЦИЯ СТОЧНЫХ ВОД
В УСЛОВИЯХ ЗОННОЙ АЭРАЦИИ АКТИВНОГО ИЛА**

1.5.6. Биотехнология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Сироткин Александр Семенович

Казань – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	11
1.1 Фосфор как биогенный элемент. Источники фосфора в водной и почвенной системах	11
1.2 Соединения фосфора в сточных водах и удаление фосфат-ионов из сточных вод	13
1.3 Принципы физико-химического удаления фосфат-ионов из воды	16
1.4 Биологическое удаление фосфат-ионов из сточных вод	18
1.4.1 Накопление аденозинтрифосфата клетками микроорганизмов	19
1.4.2 Аккумуляция фосфат-ионов клетками фосфатаккумулялирующих микроорганизмов	21
1.5 Факторы, влияющие на аккумуляцию фосфора микроорганизмами	23
1.5.1 Количество органического субстрата	23
1.5.2 Кислотность среды	25
1.5.3 Возраст активного ила	26
1.5.4 Температура	27
1.5.5 Концентрация нитратов и нитритов	29
1.5.6 Окислительно-восстановительный потенциал	31
1.5.7 Содержание ионов металлов	32
1.5.8 Концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне	32
1.6 Микробиологические и биохимические аспекты фосфатаккумуляции в процессе очистки сточных вод	34
1.7 Технологические особенности биологического удаления фосфат-ионов из сточных вод	41
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	50
2.1 Объекты исследования	50
2.2 Методы исследования	51
2.3 Постановка эксперимента	55
2.3.1 Изучение фосфатаккумуляционной способности изолятов активного ила	55
2.3.2 Изучение влияния внешних факторов среды на микробную фосфатаккумуляцию	57
2.3.3 Проведение опытно-промышленных испытаний по интенсификации биологической дефосфатации сточных вод	59
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	61
3.1 Расчет потенциальной эффективности биологической дефосфатации в процессе микробной фосфатаккумуляции	61

3.2 Получение изолятов активного ила и изучение их фосфатаккумуляционной способности	63
3.2.1 Экспериментальная оценка фосфатаккумуляционной способности изолятов активного ила	66
3.2.2 Идентификация бактериальных изолятов по фрагменту	72
3.2.3 Определение оптимального количества биомассы фосфатаккумулятивных организмов в инокуляте, обеспечивающего максимальную эффективность дефосфатации	74
3.3 Изучение влияния внешних факторов среды на микробную фосфатаккумуляцию	76
3.3.1 Мониторинг работы узла биологической очистки городских очистных сооружений	76
3.3.2 Оценка зависимости эффективности дефосфатации от факторов среды	77
3.4 Интенсификация процесса биологической дефосфатации сточных вод	84
3.4.1 Экономическое обоснование технического предложения по интенсификации процесса биологической дефосфатации сточных вод	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	107
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	109
ПРИЛОЖЕНИЯ	124

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Повышение эффективности процессов биологической очистки сточных вод с глубоким удалением биогенных элементов, среди которых одним из важнейших является фосфор, остается актуальной задачей в области экологической биотехнологии.

Являясь одним из основных важнейших макроэлементов, фосфор необходим микроорганизмам для реализации конструктивного и энергетического обмена. Фосфор, поступающий в водоемы со сточными водами, в первую очередь, в виде ортофосфатов, интенсивно вовлекается в метаболизм цианобактерий, что приводит к нарушению процессов саморегуляции в биоценозах, накоплению в воде нейро-, гепатоксинов и токсичные продукты разложения, снижению содержания растворенного кислорода в воде [1].

Одним из методов дефосфатации в процессах очистки сточных вод является биологическая трансформация фосфат-ионов с использованием микробных сообществ. Биологическое удаление фосфат-ионов из сточных вод осуществляется в процессе деятельности микроорганизмов активного ила или биопленки, в составе которых особую роль выполняют фосфатаккумулялирующие бактерии. Отличительные черты их метаболизма состоят в возможности трансформировать значительное количество фосфат-ионов с накоплением внутриклеточных полифосфатов в условиях последовательной смены условий культивирования с различным содержанием растворенного кислорода [1].

С учётом этого технологические схемы, направленные на повышение эффективности биологических процессов дефосфатации, основаны на чередовании режимов выключения и включения принудительной аэрации среды, благоприятно влияющим на процесс фосфатаккумуляции. Однако на этот процесс может влиять множество внешних факторов [2], в связи с чем организация успешной дефосфатации в масштабах очистных сооружений требует отдельного внимания, а учет этих факторов в процессе культивирования

фосфатаккумуляирующих микроорганизмов в составе микробных сообществ является важнейшей научно-технической задачей.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время особый интерес представляют исследования, направленные на повышение эффективности биологической очистки сточных вод от биогенных элементов. Значительный вклад в исследования биологического потенциала активного ила, в том числе фосфатаккумуляирующих микроорганизмов, внесли российские и зарубежные ученые Харькина О.В., Жмур Н.С., Яковлев С.В., Мешенгиссер Ю.М., Маркевич Р.М., Хенце М., Günther S., Janssen P., Fuhs G.W., Ekama G.A., Manga J., Wentzel M.C. и другие.

Представленная диссертация посвящена исследованию фосфатаккумуляирующих микроорганизмов активного ила и определения условий их культивирования в составе микробиоценоза с целью повышения эффективности дефосфатации сточных вод. Следует отметить, что разработкой проектов модульных очистных сооружений для реализации технологии глубокого удаления биогенных элементов из сточных вод занимается значительное количество малых и крупных проектных и производственных компаний, в частности, АО «Институт МосводоканалНИИпроект» (г. Москва), НПК «БИОТЕХИНЖИНИРИНГ» (г. Казань) и другие.

Цель работы состоит в определении значимых факторов культивирования фосфатаккумуляирующих микроорганизмов в составе микробного сообщества активного ила и повышении эффективности биологической дефосфатации в процессе аэробной очистки сточных вод путем последовательного чередования зон с различным содержанием кислорода.

Задачи работы:

1. Выделение изолятов фосфатаккумуляирующих микроорганизмов из активного ила, оценка их фосфатаккумуляирующей способности. Идентификация перспективных изолятов фосфатаккумуляирующих микроорганизмов активного ила.

2. Экспериментальные исследования процесса дефосфатации модельных растворов сточных вод в лабораторных условиях с использованием полученных изолятов фосфатаккумулялирующих микроорганизмов активного ила.

3. Комплексная оценка влияния внешних факторов среды на эффективность дефосфатации сточных вод на основании статистической обработки результатов теххимического анализа состава сточных и очищенных вод очистных сооружений.

4. Проведение опытно-промышленных испытаний по интенсификации процесса биологической дефосфатации сточных вод путем чередования зон с различным уровнем растворенного кислорода в узле биологической очистки очистных сооружений.

Новизна результатов диссертации.

1. Получены новые экспериментальные данные о фосфатаккумулялирующей способности изолятов микробного сообщества активного ила очистных сооружений, обеспечивающей удаление до 45 % фосфат-ионов из сточных вод. Доказано участие в процессе биологической дефосфатации сточных вод бактериальной культуры *Pseudomonas atacamensis*.

2. По результатам статистического анализа многочисленных экспериментальных данных процесса биологической дефосфатации коммунально-бытовых сточных вод с эффективностью от 77 до 89 % в масштабе производственных очистных сооружений оценено влияние концентрации растворенного кислорода на микробную фосфатаккумуляцию в процессе удаления фосфатов из сточных вод.

3. Экспериментально оценено влияние зонной аэрации в процессе аэробной очистки сточных вод микроорганизмами активного ила на эффективность биологической дефосфатации, позволившей повысить степень удаления фосфат-ионов из сточных вод на 40-45 % по сравнению с условиями постоянной аэрации сточных вод.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в следующем:

Получена оценка фосфатаккумулялирующей способности изолятов активного ила, достигающей 98 %, на основании решения уравнений материального баланса процесса биологической дефосфатации сточных вод и определения значимости влияния факторов среды на процесс биологической дефосфатации сточных вод.

Разработано, испытано в опытно-промышленных условиях и внедрено техническое предложение по модернизации биотехнологии аэробной очистки сточных вод путем реализации принципа зонной аэрации в аэротенках очистных сооружений, что позволило увеличить эффективность биологической дефосфатации сточных вод, в среднем, на 40-45 % в сравнении с режимом постоянной аэрации. Получены акты работ, выполненных на производственных очистных сооружениях АО «Зеленодольск-Водоканалсервис» (г. Зеленодольск), а также ООО «НПК Биотехинжиниринг» по результатам проведения опытно-промышленных испытаний на очистных сооружениях БТИ-БОС с. Кошаково Пестречинского района Республики Татарстан с оценкой эффективности модернизации процесса биологической очистки сточных вод (Приложения А, Б).

Определено, что при реализации принципа зонной аэрации в аэротенках очистных сооружений БТИ-БОС с. Кошаково суммарная величина снижения затрат для очистки сточных вод объемом 400 м³/сутки может достигать около 1 млн. рублей в год за счет снижения затрат на закупку дефосфатирующих реагентов, потребляемую компрессорами электроэнергию, а также за счет предотвращенного экологического ущерба окружающей среде.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы проведения технологических экспериментов в лабораторных и опытно-промышленных условиях с аналитическим контролем состава сточных вод с использованием титриметрических и колориметрических методов, расчета эффективности процесса дефосфатации сточных вод с учетом влияния факторов, определяющих протекание условия развития фосфатаккумулялирующих микроорганизмов, анализа состава и свойств изолятов микроорганизмов, полученных из микробного сообщества активного ила с использованием

микробиологических методов, а также методов электронной микроскопии с элементным анализом и молекулярно-биологических методов, таких анализ последовательности 16S рРНК для идентификации фосфатаккумуляирующих микроорганизмов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Бактериальный изолят Р, выделенный из активного ила и идентифицированный как *Pseudomonas atacamensis*, обладает способностью к фосфатаккумуляции.

2. На основании результатов решения уравнений материального баланса процесса биологической дефосфатации сточных вод степень удаления фосфат-ионов в процессе фосфатаккумуляции составляет 98 %.

3. Степень удаления фосфат-ионов из модельной питательной среды накопительными культурами изолятов активного ила достигает 45 %.

4. Наиболее значимым внешним фактором, влияющим на эффективность дефосфатации сточных вод, является концентрация растворенного кислорода.

5. Организация последовательной смены зон с пониженным и повышенным содержанием растворенного кислорода в сооружениях биологической очистки способствует увеличению эффективности удаления фосфат-ионов из сточных вод за счет активации группы фосфатаккумуляирующих микроорганизмов в составе активного ила, что обеспечивает повышение эффективности биологической дефосфатации сточных вод на 40-45 % в сравнении с режимом постоянной аэрации.

Достоверность результатов исследования обеспечивается воспроизводимостью результатов, использованием комплекса стандартизированных методик их аналитического контроля и анализа, а также современных методов и оборудования для проведения экспериментальных работ.

Публикации. Результаты, полученные в ходе данной работы, были опубликованы в 19 работах, из них 2 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для размещения материалов

диссертаций, и 17 статей в других изданиях и сборниках научных трудов конференций.

Апробация результатов диссертационного исследования. По итогам представления результатов, обсужденных в диссертации, автор диссертации является победителем конкурса научных работ Республиканской молодежной экологической научной конференции, (г. Казань, 2018), Международного конкурса научно-исследовательских работ «Актуальные проблемы науки и техники», (г. Казань, 2020), конкурса на соискание премии Мэра г. Казани (г. Казань, 2022).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Проведенное исследование соответствует паспорту специальности 1.5.6. Биотехнология (технические науки), а именно пункту 7: «Разработка новых технологических процессов на основе микробиологического синтеза, биотрансформации, биокатализа, иммуносорбции, биодеструкции, биоокисления и создание систем биокомпостирования различных отходов, очистки техногенных отходов (сточных вод, газовых выбросов и др.), создание замкнутых технологических схем микробиологического производства, последние с учетом вопросов по охране окружающей среды».

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 130 страницах, состоит из введения, 3 глав, основных выводов, списка литературы, включающего 132 наименований отечественных и зарубежных публикаций, содержит 39 рисунков, 24 таблицы, 2 приложения.

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии в обсуждении цели и задач диссертационного исследования, поиске и анализе литературных данных, выполнении экспериментальных работ, обработке и обсуждении результатов исследований, формировании выводов совместно с научным руководителем, написании публикаций по теме диссертации и участие в конференциях, конкурсах.

Автор выражает благодарность заведующему кафедрой промышленной биотехнологии, д.т.н. Сироткину Александру Семеновичу за научное

руководство, постановку целей и задач исследования, консультирование и обсуждение научных результатов; доценту кафедры промышленной биотехнологии, к.т.н. Вдовиной Татьяне Владимировне за помощь в ходе проведения исследовательской работы и обсуждении её результатов; руководителю лаборатории молекулярно-генетических и микробиологических методов, к.б.н. (PhD) Валидову Шамилю Завдатовичу за проведение процедуры идентификации бактериальных изолятов на основе анализа последовательности 16S рРНК на базе лаборатории Татарского НИИ сельского хозяйства ФИЦ КазНЦ РАН.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Фосфор как биогенный элемент. Источники фосфора в водной и почвенной системах

Соединения фосфора играют важную роль в биологических системах. Этот элемент входит, например, в состав фосфатных групп молекул рибонуклеиновых кислот (РНК) и дезоксирибонуклеиновых кислот (ДНК), ответственных за биосинтез белков и передачу наследственной информации. На рисунке 1.1 [4] представлена реакция образования дезоксирибонуклеотида – предшественника молекулы ДНК.

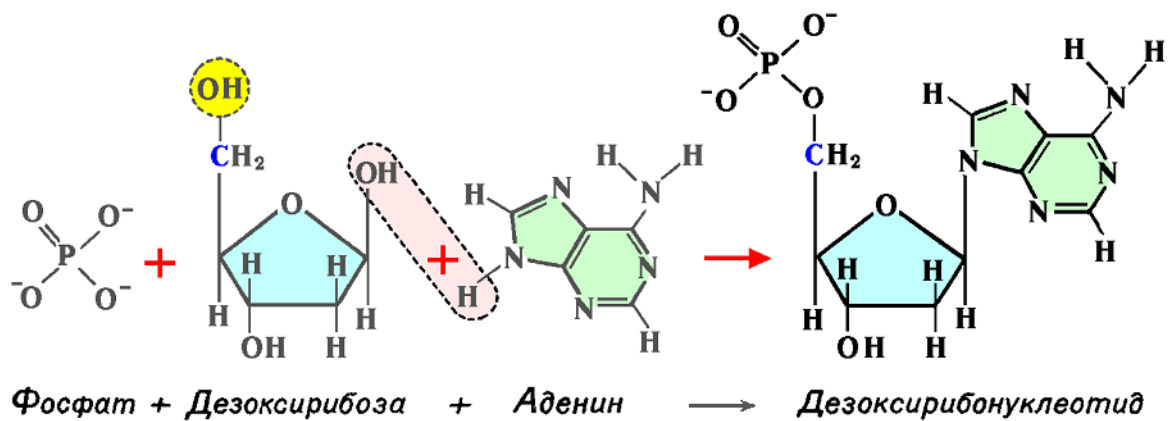


Рисунок 1.1 – Реакция образования дезоксирибонуклетида [4]

Фосфор входит также в состав молекул аденозинтрифосфата (АТФ), при помощи которых запасается энергия в биологических клетках [4]. Строение молекулы АТФ представлено на рисунке 1.2 [5].

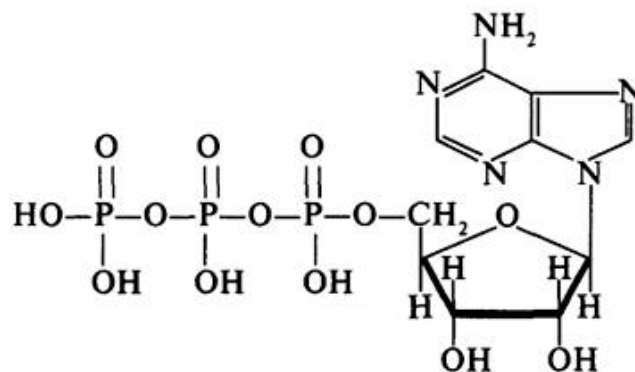


Рисунок 1.2 – Строение молекулы аденозинтрифосфата [5]

С точки зрения развития процесса эвтрофирования водоемов под действием биогенных элементов в составе сточных вод главенствующая роль в этом процессе принадлежит фосфору, поэтому для торможения процесса эвтрофирования необходимо, в первую очередь, удалять соединения фосфора [6]. Удаление биогенных элементов требуется также при организации оборотных замкнутых систем водоснабжения промышленных предприятий, использующих для этой цели биологически очищенные городские сточные воды. Показано, что наличие соединений азота и фосфора вызывает биологическое обрастание трубопроводов оборудования [7].

Основными источниками поступления биогенных элементов в природные водоемы являются отходы производственной и бытовой деятельности человека, а также неорганизованный сброс сточных вод с территорий городов и промышленных площадок предприятий.

Таким образом, существенным источником поступления биогенных элементов являются неочищенные бытовые и промышленные сточные воды. Ежегодно без очистки в водные объекты России сбрасывается около 20 % от общего объема образующихся сточных вод. Сброс биогенных элементов с хозяйственно-бытовыми сточными водами составляет 1,5-1,8 г фосфатов в расчете на одного жителя в сутки. В бытовых водах находятся также моющие средства, в составе которых содержание ортофосфатов может достигать до 30-50 % [1].

Основная часть фосфора находится в городских сточных водах в растворенной форме – около 50 % в виде ортофосфатов. Только порядка 15-20 % общего фосфора находится в нерастворенном виде и осаждаются в первичных отстойниках без добавления реагентов. Традиционные методы очистки сточных вод от фосфора заключаются в переводе его из растворенной формы в нерастворенную, осаждении и удалении из системы [8].

Почва также подвергается загрязнению соединениями фосфора [9], которые далее вымываются грунтовыми водами и приводят к эвтрофикации водоемов [10,11]. Водорастворимые фосфорные удобрения в значительной мере поглощаются почвой, становятся малодоступными растениям и не передвигаются

по почвенному профилю. Установлено, что первая культура использует из фосфорных удобрений всего 10-30 % фосфора в пересчете на P_2O_5 , а остальное количество остается в почве и претерпевает всевозможные превращения. Например, в кислых почвах фосфор суперфосфата в большей части превращается в фосфаты железа и алюминия, а в черноземных и во всех карбонатных почвах – в нерастворимые фосфаты кальция. Систематическое и длительное применение фосфорных удобрений сопровождается постепенным окультуриванием почв. Известно, что длительное применение больших доз фосфорных удобрений может привести к так называемому «зафосфачиванию», когда почва обогащается усвояемыми фосфатами и новые порции удобрений не оказывают эффекта. В этом случае избыток фосфора в почве может нарушить соотношение между питательными веществами и иногда снижает доступность растениям цинка и железа [11].

1.2 Соединения фосфора в сточных водах и удаление фосфат-ионов из сточных вод

На рисунке 1.3 представлена схема трансформации соединений фосфора в процессе биологической очистки [1].

В канализацию с бытовыми сточными водами поступают минеральные и органические формы фосфора, причем до 50-70 % в них составляют ортофосфаты, до 15 % – нерастворимый фосфор на взвешенных частицах, большая часть которого улавливается в первичных отстойниках [12].

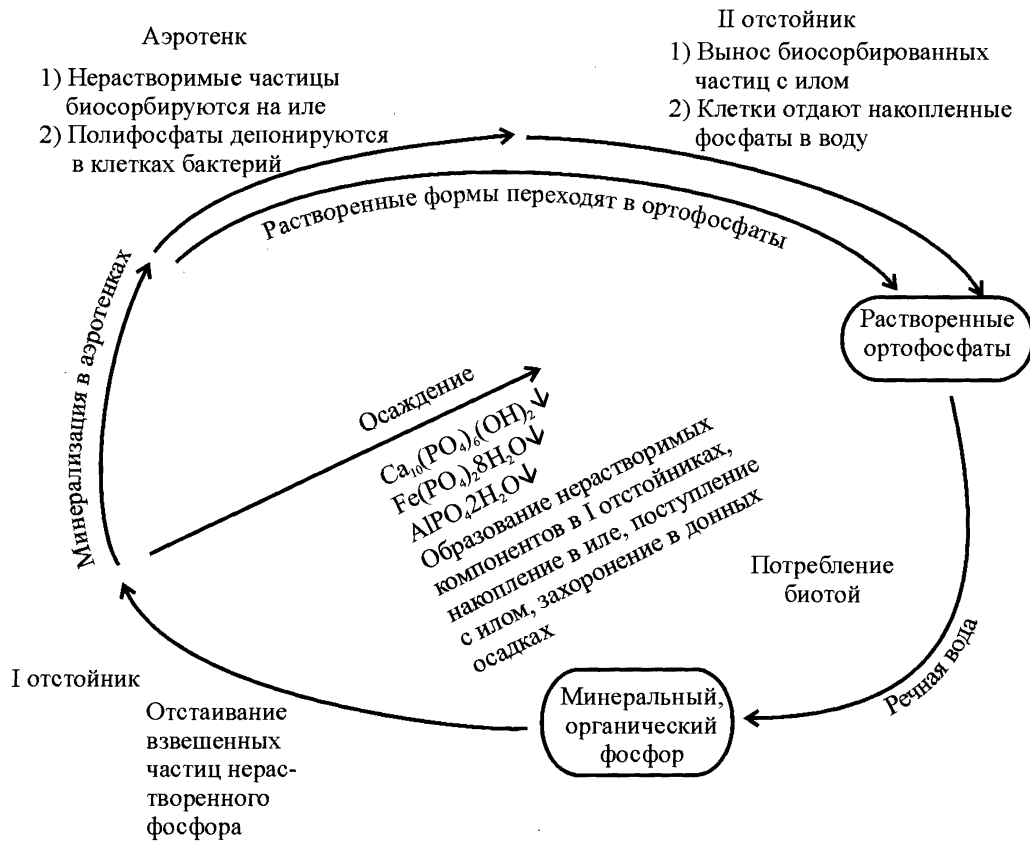


Рисунок 1.3 – Схема процессов трансформации соединений фосфора в сооружениях биологической очистки [1]

На традиционных станциях очистки сточных вод, в основе которых лежит окисление загрязняющих веществ органической природы дефосфатация протекает в процессе первичного отстаивания (осаждение нерастворенных соединений фосфора), а также в аэротенках в результате использования для метаболических нужд и накопления фосфорных соединений в составе биомассы, в том числе выводимого избыточного активного ила. В ходе работы традиционных сооружений, очищающих коммунально-бытовые сточные воды, эффективность удаления фосфора составляет в среднем 20 %. В случаях временного увеличения биомассы активного ила возможно увеличение значения эффективности до 40 %, однако это не является показателем глубокой очистки сточных вод от фосфора [12].

Таким образом, дефосфатация сточных вод на очистных сооружениях идет за счет извлечения нерастворенных форм фосфора в сооружениях физико-

механической очистки с последующим удалением растворенных форм в узлах биологической очистки [13].

Фосфаты, представленные растворенными формами извлекаются из сточных вод посредством химического связывания с ионами металлов и дальнейшим осаждением нерастворимых солей, биологическим методом с участием фосфатаккумулялирующих организмов, а также в результате совместной биолого-химической обработки сточных вод.

Для химического связывания ортофосфатов в составе сточных вод в качестве реагентов могут быть использованы традиционные минеральные коагулянты, применяемые в практике водоподготовки: сульфаты железа (III), алюминия, железный купорос. Можно также использовать отходы производств, содержащие соли Fe^{2+} , Fe^{3+} и Al^{3+} , не подавляющие биологические процессы очистки сточных вод [13].

Иногда в качестве реагента применяется известь. Однако вследствие повышения величины рН воды до 11 и более и необходимости последующей нейтрализации очищенных сточных вод, а также возможного образования отложений карбоната кальция на поверхности трубопроводов, загрузки фильтров предпочтение следует отдавать алюминий- или железосодержащим реагентам.

При введении реагентов на ступени механической очистки сточных вод, т.е. при предварительном осаждении соединений фосфора, одновременно имеет место значительное снижение концентрации органических и других загрязняющих веществ. Поэтому предварительное осаждение фосфатов целесообразно применять для очистки производственных и смеси городских и производственных сточных вод с величиной БПК_{полн} более 400 мг/дм³, а также при перегрузке очистных сооружений [13].

Биологическое удаление фосфора из сточных вод осуществляется в ходе жизнедеятельности фосфатаккумулялирующих организмов (ФАО), прежде всего, микроорганизмов, которые потребляют значительно больше фосфора, чем его необходимо для обеспечения их роста. Эти микроорганизмы потребляют дополнительный фосфор, который они используют в качестве энергетического

запаса, что позволяет им далее потреблять субстрат в анаэробных условиях. Восполнение израсходованного фосфата происходит в аэробных условиях [14].

Для удаления из сточных вод соединений фосфора также применяется биолого-химическая очистка. При биолого-химической очистке традиционные схемы сооружений биологической очистки (с заключительным фильтрованием сточных вод или без него) дополняются реагентным хозяйством, включающим растворные и расходные баки для коагулянтов и помещение для их хранения [12].

Выбор способа очистки загрязненных сточных вод зависит от технико-экономических показателей процесса, концентрации загрязняющих веществ в сточных водах и требований, предъявляемых к очищенным сточным водам [12].

1.3 Принципы физико-химического удаления фосфат-ионов из воды

Как было сказано выше, для очистки сточных вод от фосфатов *реагентными методами*, чаще всего, используют соли алюминия и железа, которые действуют как реагенты и коагулянты одновременно.

Основные реагенты [15-22], применяемые для очистки сточных вод от фосфатов, представлены на рисунке 1.4 [23].

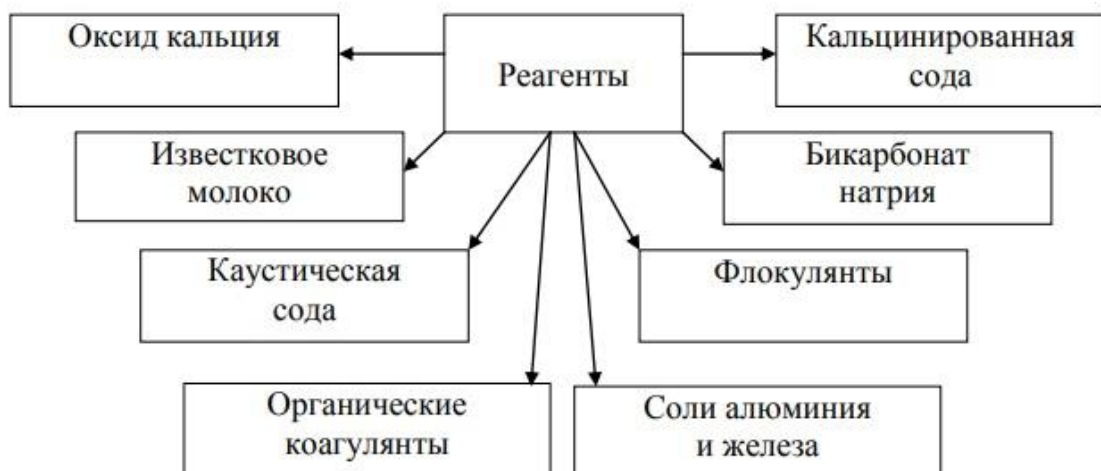


Рисунок 1.4 – Реагенты, применяемые для очистки сточных вод от фосфатов [23]

Соли железа, как коагулянты, имеют преимущества в сравнении солями алюминия как показано на рисунке 1.5 [24].

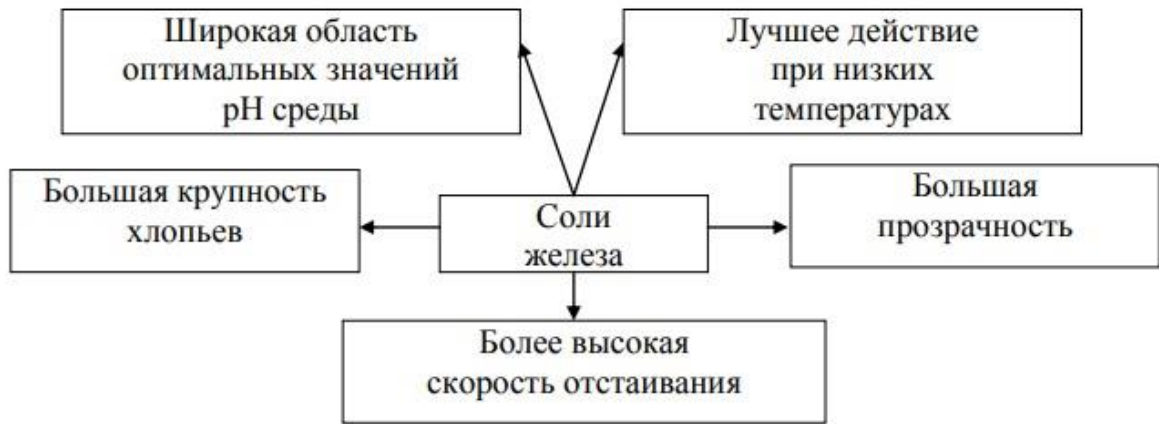
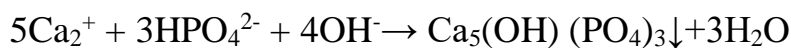
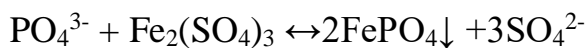
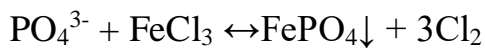
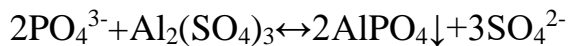


Рисунок 1.5 – Преимущества солей железа как коагулянтов по сравнению с солями алюминия [24]

Фосфаты, присутствующие в городских сточных водах, осаждаются последующим реакциям:



Установлено, что увеличение количества трехвалентного железа, добавляемого к сточным водам, улучшает удаление растворимых фосфатов [25]. При рН среды больше 5 происходит гидролиз солей железа, который приводит к образованию гелеобразного осадка гидроксида железа (III), что способствует выделению из сточных вод фосфатов и тяжелых металлов [26-28].

Расчет количества подаваемого реагента (доза) рассчитывается по формуле (1.1):

$$X_{\text{Me}} = \beta \frac{X_{\text{P,prec}} \cdot \text{AM}_{\text{Me}}}{\text{AM}_{\text{P}}}, \quad (1.1)$$

где X_{Me} – доза реагента, мг/дм³,

$X_{\text{P,prec}}$ – количество фосфора, которое необходимо удалить, мг/дм³;

AM_{Me} – атомная масса металла, входящего в состав реагента, мг/ммоль;

AM_P – атомная масса фосфора, мг/ммоль;

β – коэффициент учета превышения используемой дозы реагента, которая требуется для удаления 1 моля фосфора, по сравнению с стехиометрической дозой – зависит от особенностей организации очистки сточных вод и места внесения реагента ($\beta = 1,2-2,5$) [29].

Адсорбционные методы преимущественно применяются для глубокой очистки сточных вод [30-35]. Достоинством метода адсорбции является высокая эффективность, а также возможность очистки сточных вод, содержащих несколько веществ. В качестве адсорбентов часто применяют активированный уголь, торф, опилки, золу, различные синтетические материалы, а также разнообразные отходы промышленных производств [35-43].

Одной из актуальных проблем при использовании сорбционных технологий остается регенерация или утилизация отработанных сорбентов [44,45]. Наиболее универсальными адсорбентами являются активированные угли. Однако их использование ведет к значительному удорожанию процесса очистки сточных вод за счет необходимости регенерации сорбентов [31].

Очистка сточных вод, содержащих фосфаты до 20 мг/дм³, может быть осуществлена с помощью отходов сталеплавильной промышленности, например, шлака Оскольского металлургического комбината [46-54]. Показано, что при применении шлака АО "Оскольский электрометаллургический комбинат" для очистки фосфатсодержащих сточных вод происходит снижение концентрации фосфат-ионов, в среднем, на 59 % [55].

1.4 Биологическое удаление фосфат-ионов из сточных вод

Биологическое удаление фосфатов из сточных вод в технологиях биологической очистки активным илом осуществляется двумя основными путями:

1. В процессе роста аэробных микроорганизмов, участвующих в процессах биологической очистки сточных вод (накопление молекул АТФ, конструктивный обмен клетки);

1,3-дифосфоглицериновой кислоты в 3-фосфоглицериновую кислоту и фосфоэнолпировиноградной кислоты в пировиноградную кислоту в процессе гликолиза.

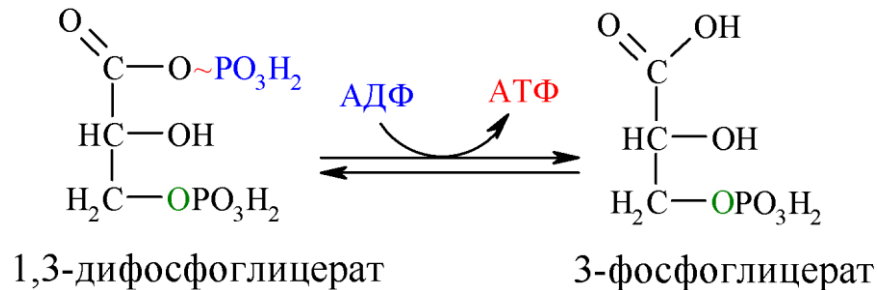


Рисунок 1.7 – Схема протекания процесса субстратного фосфорилирования [58]

Окислительное фосфорилирование приводит к образованию АТФ одновременно с процессом переноса протонов и электронов в дыхательной цепи с участием специфических ферментов (рис. 1.8) [59].

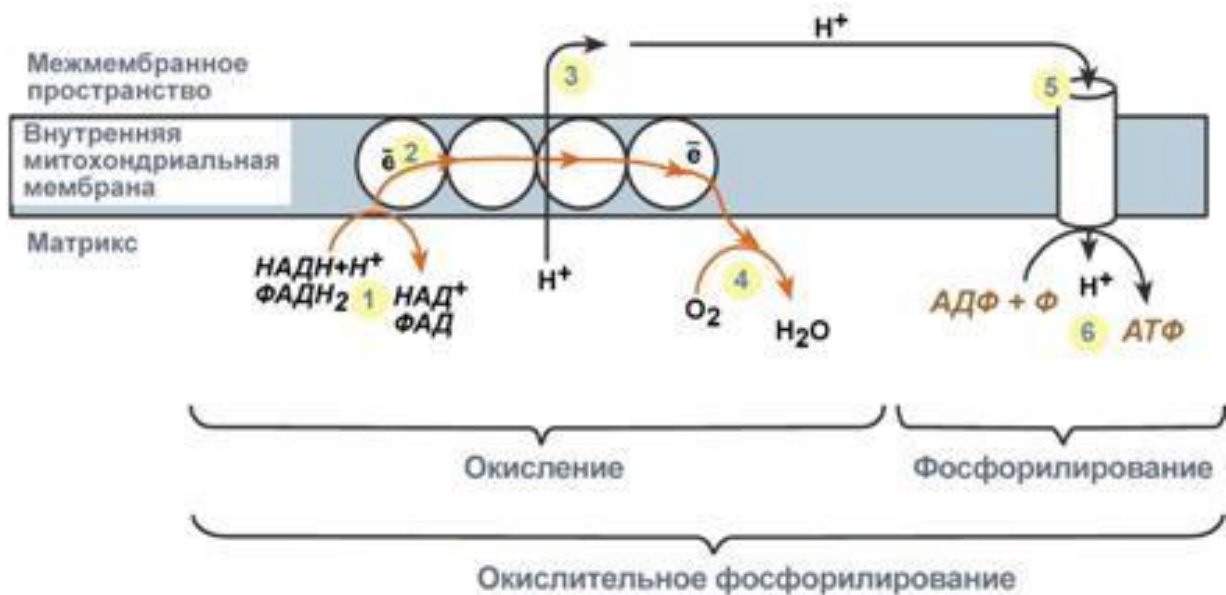


Рисунок 1.8 – Схема протекания процесса окислительного фосфорилирования [59]

В целом работа дыхательной цепи заключается в следующем (рис. 1.8): 1 – образующиеся в реакциях катаболизма никотинамидадениндинуклеотида (НАДН) и флавинадениндинуклеотида (ФАДН₂) передают атомы водорода (т.е. протоны водорода и электроны) на ферменты дыхательной цепи; 2 – электроны движутся

по ферментам дыхательной цепи и теряют энергию; 3 – эта энергия используется на выкачивание протонов H^+ из матрикса в межмембранное пространство; 4 – в конце дыхательной цепи электроны попадают на кислород и восстанавливают его до воды; 5 – протоны H^+ стремятся обратно в матрикс и проходят через АТФ-синтазу; 6 – при этом они теряют энергию, которая используется для синтеза АТФ [59].

На каждые 2 атома водорода, поступившие в дыхательную цепь, синтезируются 3 молекулы АТФ. Окислительное фосфорилирование осуществляется аэробными и факультативно анаэробными микроорганизмами [59].

1.4.2 Аккумуляция фосфат-ионов клетками фосфатаккумулялирующих микроорганизмов

Исследования процессов биологического удаления фосфора ведутся с 40-х годов прошлого столетия. В ходе исследований было обнаружено [60], что при чередовании анаэробных и аэробных зон в биологических очистных сооружениях наблюдаются увеличение концентрации фосфора в водной фазе в анаэробных зонах с «высвобождением» фосфора из полифосфатов, а затем интенсивное потребление фосфора в аэробных зонах. Таким образом, последовательная смена анаэробных и аэробных условий культивирования фосфатаккумулялирующих микроорганизмов приводит к эффекту «жадного» поглощения фосфора из сточных вод [14].

Дальнейшее исследование процесса биологической дефосфатации сточных вод позволило определить, что, хотя основная роль в ходе процесса «жадного» поглощения фосфора принадлежит бактериям р. *Acinetobacter*, способностью накапливать фосфор обладают и другие гетеротрофные микроорганизмы, которые обобщенно называются фосфатаккумулялирующие организмы [14].

Схема процессов поглощения и выделения фосфора при смене аэробных и анаэробных условий клетками фосфатаккумулялирующих бактерий представлена на рисунке 1.9 [1].

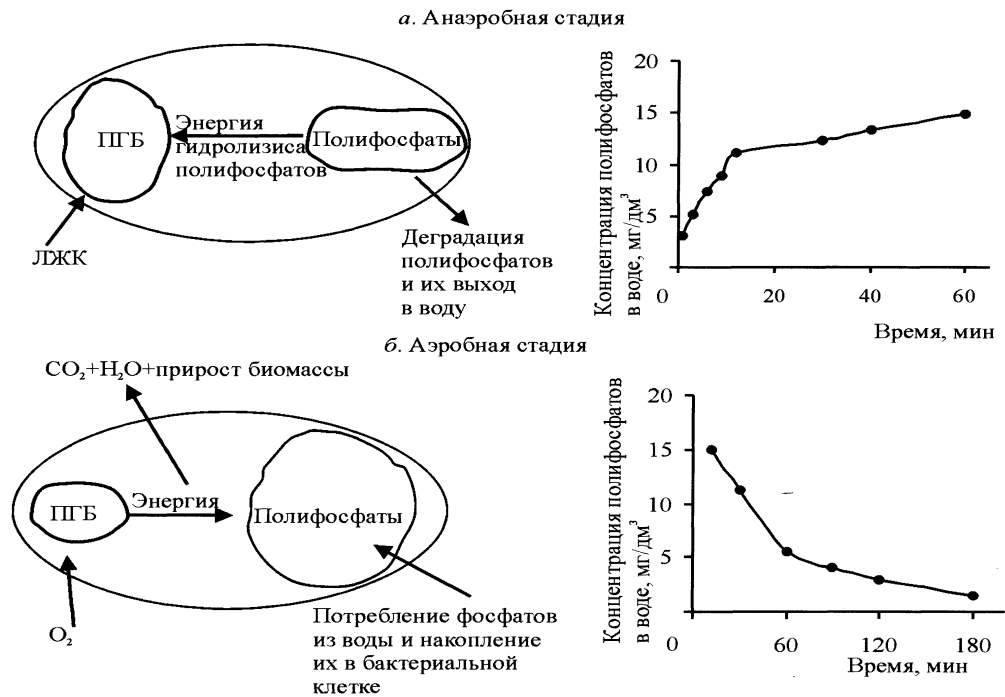


Рисунок 1.9 – Процесс накопления и отдачи полифосфатов в воду клетками фосфатаккумулирующих бактерий при смене анаэробных (а) и аэробных (б) условий [1]

Фосфатаккумулирующие бактерии в анаэробных условиях потребляют летучие жирные кислоты (ЛЖК) и накапливают их внутри клетки в виде полгидроксибутирата (ПГБ). Процесс накопления обеспечивается энергией, которая образуется в результате разложения полифосфата до ортофосфата. В аэробных условиях эти микроорганизмы растут, потребляя при этом фосфаты и накапливая их в виде внутриклеточных гранул полифосфатов. Основным источником энергии, необходимой для этого процесса является окисление ПГБ, однако эти микроорганизмы также способны окислять и другие органические вещества, доступные в анаэробных условиях [14].

С учетом сказанного, эффективное удаление фосфатов в процессах биологической очистки городских сточных вод реализуется путем создания условий культивирования активного ила, основанных на чередовании аэробных, анаэробных и анноксидных зон, что способствует формированию специфических сообществ в составе активного ила [1].

1.5 Факторы, влияющие на аккумуляцию фосфора микроорганизмами

На процесс фосфатаккумуляции могут оказывать воздействие такие факторы, как количество органического субстрата, рН среды, возраст активного ила, температура, количество нитратов и нитритов, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), содержание металлов, концентрация кислорода в аэробной зоне.

К примеру, за счет депонирования полифосфатов в клетках активного ила из сточных вод изымаются растворимые соединения фосфора. Причем в условиях биологической очистки сточных вод с недостаточно эффективной нитрификацией (с накоплением азота нитратов не более 5-6 мг/дм³) за счет потребления фосфатов бактериями в аэротенках удаляется 10-30 % растворенных форм фосфора.

При понижении рН сточных вод повышается растворимость фосфатов, и усиливаются оба процесса: удаление фосфатов микроорганизмами активного ила очистных сооружений и накопление в результате процесса биофлокуляции, что позволяет достичь 50 % эффективности удаления соединений фосфора в процессе биологической очистки [61].

1.5.1 Количество органического субстрата

Глубокое изучение процесса биологической дефосфатации сточных вод и распространённое использование данного процесса на очистных станциях показывает, что для проведения биологической дефосфатации с высокой степенью удаления соединений фосфора количество органических веществ по ХПК должно относиться к количеству фосфора в соотношении не меньше 35:1, в случае использования параметра БПК₅ соотношение должно быть не менее 20:1. По данным [62] на каждый 1 г фосфора при использовании технологии биологической дефосфатации сточных вод необходимо 10 г легко разлагаемого органического субстрата. Для проектирования городских очистных сооружений в Северной Америке [63] оптимальное отношение ХПК/мг к Р составляет 50:1. Для увеличения эффективности очистки сточных вод в Южной Африке [64] требуемое

соотношение ХПК/мг к Р составляет 50-59:1, при увеличении содержания органических веществ возможна организация глубокой очистки с достижением концентрации фосфора в очищенной воде 0,5 мг/дм³. Однако при проведении процесса биологического дефосфатации сточных вод наибольшее влияние оказывают как тип органического субстрата, так и его биологическая доступность в условиях отсутствия растворенного кислорода в очищаемой воде [2]. Согласно литературным данным органические вещества, выступающие в качестве субстрата для микроорганизмов активного ила в процессах очистки сточных вод, разделяются на короткоцепочечные, или летучие жирные кислоты (ЛЖК), и длинноцепочечные жирные кислоты (не-ЛЖК). В ряде исследований, изучающих процесс глубокой дефосфатации активным илом, для достижения высокой эффективности очистки необходимо присутствие в сточных водах органических веществ с длиной углеродной цепи C1-C6 или ЛЖК. В то же время значительное количество исследователей отмечают, что при использовании ацетата или пропионата в качестве основного субстрата, наблюдалось более активное высвобождение внутриклеточного фосфора в среду [65-67]. В исследовательских работах показано, что в анаэробной зоне минимальное содержание легкоусвояемых органических веществ по ХПК, относящихся к группе ЛЖК, должно составлять 25 мг/дм³. Увеличение содержания ЛЖК приводит к повышению количества фосфора, высвобождаемого в условиях отсутствия кислорода, что приводит к более интенсивному депонированию органических веществ внутри клеток. Однако, согласно исследованиям [2] увеличение концентрации ацетата по ХПК до 400 мг/дм³ и более приводит к ингибированию процесса глубокой биологической дефосфатации сточных вод. Стоит отметить наличие в активном иле других групп микроорганизмов, обладающих, так же как и фосфатаккумулялирующая группа, способностью к внутриклеточному накоплению легкоусвояемых органических веществ в условиях отсутствия растворенного кислорода в среде, провоцируя конкуренцию за органический субстрат. К таким группам относят, к примеру, гликогенаккумулялирующих организмов (ГАО (Glycogen Accumulating Organisms – GAOs)), скорость

накопления ацетата и глюкозы внутри клеток у которых значительно быстрее по сравнению с ФАО, что дает им преимущество в конкуренции за энергетический запас. Группа ГАО представлена гетеротрофными микроорганизмами, не способными к запасанию энергии в виде внутриклеточных полифосфатов, однако в анаэробных условиях могут составить конкуренцию ФАО за легкоокисляемый субстрат [2]. В условиях пониженного содержания глюкозы и значительного количества ацетата ГАО значительно уступают фосфатаккумулялирующим бактериям, поскольку скорость потребления ацетата у группы ФАО выше, чем у гликогенаккумулялирующих бактерий. Присутствие в биоценозе представителей как группы ФАО, так и ГАО, возможно, если в условиях недостатка растворенного кислорода ацетат будет содержаться в концентрациях, которые значительно превышают потребности фосфатаккумулялирующих бактерий [68].

1.5.2 Кислотность среды

Для успешного протекания процесса биологической дефосфатации в анаэробных условиях необходимо поддержание значений рН в оптимальном диапазоне, равном 7,0-9,0 [2]. На рисунках 1.10, 1.11 [34] показаны кривые поглощения ацетата и высвобождения фосфора при изменении значений рН среды [69].

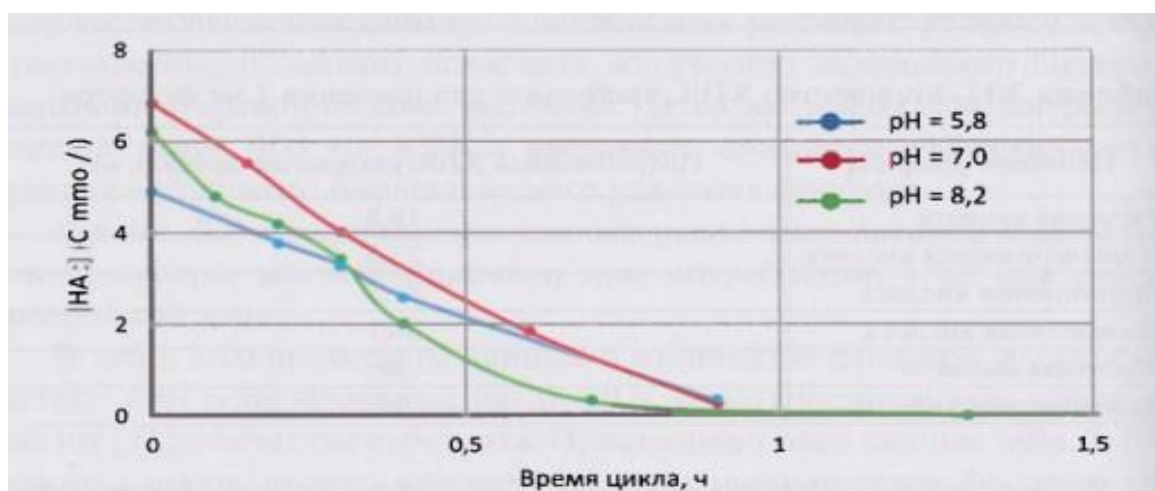


Рисунок 1.10 – Изменение концентрации ацетата при различных значениях рН

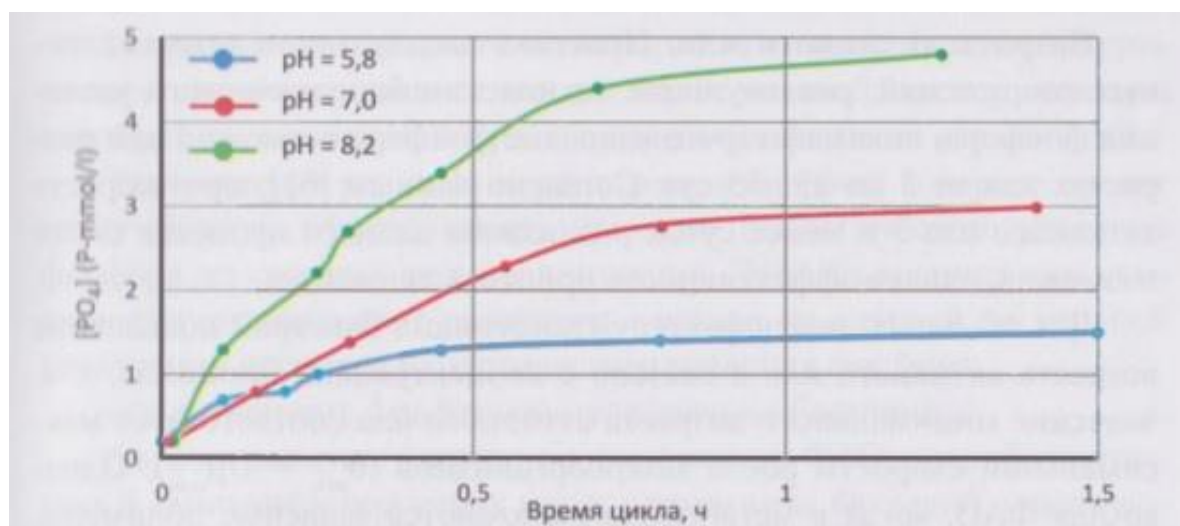


Рисунок 1.11 – Изменение концентрации фосфора при различных значениях pH [34]

Таким образом, влияние на процесс биологической дефосфатации оказывает активная реакция среды, в которой находится активный ил. При этом данный параметр в условиях недостатка растворенного кислорода является наиболее значимым [2].

1.5.3 Возраст активного ила

Оптимальное значение возраста активного ила, выявленное на основании длительного опыта эксплуатации очистных сооружений, в основе которых лежит принцип биологической дефосфатации сточных вод, составляет от 3 до 25-35 суток. Согласно литературным данным [70], несмотря на возможность проведения процесса биологического удаления фосфора, степень очистки уменьшается при значениях возраста активного ила 3 и менее суток. Для гетеротрофных бактерий в составе биоценоза, не относящихся к группе ФАО, значению максимальной скорости роста микроорганизмов соответствует минимальному возрасту активного ила, а именно увеличение возраста активного ила связано с концентрацией биомассы [2]. Что касается представителей активного ила, относящихся к группе ФАО, изменение возраста ила влечет изменения во внутриклеточных запасенных компонентах, что приводит к срыву процесса

биологической дефосфатации сточных вод, поскольку речь идет о метаболизме, включающем внутриклеточные запасные вещества. В данном случае скорость метаболизма ПГБ в условиях повышенного и пониженного содержания растворенного кислорода и величиной накопления ПГБ в клетках бактерий влияют на скорость поглощения фосфатов из очищаемых вод [2]. Что касается минимального возраста ила в зонах с различным содержанием кислорода, достаточного для поглощения необходимого количества ацетата, то он составляет 3 суток. При меньшем возрасте ила может возникнуть срыв процесса очистки даже при условии наличия ацетата в необходимом количестве, поскольку содержание внутриклеточных полифосфатных гранул становится слишком низким для обеспечения поглощения ацетата в анаэробных условиях. При значениях общего возраста активного ила более 20-25 суток наблюдается снижение эффективности процесса биологического удаления фосфора [71]. Основные причины этого:

1) снижение прироста активного ила при его высоких возрастах, в результате чего общее количество выводимого из системы фосфора в составе ФАО снижается;

2) избыточное количество кислорода в аэробной зоне сооружения, в результате чего все запасные вещества в клетках фосфатаккумулялирующих бактерий, включая гликоген, окисляются и рост ФАО прекращается, что приводит к снижению доли ФАО в общей массе активного ила и, как следствие, к уменьшению эффективности процесса биологического удаления фосфора в сооружении;

3) при высоком возрасте активного ила возможно развитие процесса его минерализации и, как следствие, высвобождение в среду растворимых фосфатов из клеток ФАО [34].

1.5.4 Температура

Температура является параметром, изменение которого влияет на суммарную эффективность процесса биологического удаления фосфора из

сточных вод неоднозначно. Это обусловлено тем, что на каждый из этапов процесса биологической дефосфатации температура оказывает различное влияние [2]:

- активность бактерий группы ФАО;
- доли ФАО, нитрифицирующих и денитрифицирующих микроорганизмов, бактерий активного ила, осуществляющих окисление органических загрязнений в аэробных условиях;
- разложение длинноцепочечных соединений в условиях недостатка кислорода и т. д. [34].

В таблице 1.1 описаны изменения на разных этапах процесса биологической дефосфатации при уменьшении температуры очищаемых сточных вод [72].

Таблица 1.1 – Эффекты от снижения температуры в процессе биологической дефосфатации сточных вод [72]

Этап	Влияние	Результат	Эффективность суммарного процесса
Активность ФАО	Уменьшение скорости метаболизма	Уменьшение количества высвобождающегося и поглощаемого фосфора	Уменьшение
	Увеличение прироста ила за счет уменьшения лизиса клеток микроорганизмов	Увеличение потенциала запасаения полифосфатных гранул клетками ФАО	Увеличение
Доля ФАО в активном иле	Изменение доли ФАО в иле	Изменение кинетики процессов высвобождения и поглощения фосфора	Уменьшение/увеличение
	Уменьшение эффективности процессов нитрификации и, как следствие, уменьшение количества нитратов в возвратных потоках, поступающих в анаэробную зону	Больше доступного для ФАО субстрата, увеличение потенциала запасаения ФАО	Увеличение
	Уменьшение эффективности процесса распада органических соединений, снижение количества ЛЖК	Уменьшение количества субстрата, доступного ФАО, снижение потенциала запасаения ФАО	Уменьшение

Как видно из таблицы 1.1, эффективность процесса биологической дефосфатации может повышаться или снижаться при изменении температуры. Численное значение упомянутого эффекта определяется с условиями протекания процесса биологической очистки сточных вод. К примеру, полная нитрификация будет протекать значительно эффективнее при низких нагрузках на активный ил по органическим соединениям, чем при высоких нагрузках. В то же время процесс глубокой денитрификации не возможен при низких нагрузках по органическим соединениям, что служит причиной повышения содержания нитратов, поступающих в анаэробную зону. Это повлечет за собой негативный эффект на процесс биологической дефосфатации даже в большей степени, чем при проведении процесса при высоких нагрузках [2].

В большинстве же случаев повышение температуры оказывает положительное влияние на эффективность процессов высвобождения и поглощения фосфора у бактерий, относящихся к группе ФАО. Поскольку на изменение температуры реагирует активная биомасса, то при оценке процессов биологической дефосфатации активным илом при разных значениях температур скорости высвобождения и поглощения фосфат-ионов выражаются как удельные скорости процессов [34].

1.5.5 Концентрация нитратов и нитритов

Концентрация нитратов и нитритов могут иметь как положительное, так и отрицательное влияние на процесс глубокой дефосфатации сточных вод. С одной стороны, денитрифицирующим бактериям, относящимся к группе ФАО, при их направленном культивировании нитраты необходимы для осуществления процесса депонирования фосфатов внутри клеток [2]. К примеру, бактерии р. *Zooglea* способны как к накоплению полифосфатных гранул [73], так и принимают участие в процессе денитрификации в составе активного ила [74]. С другой стороны, в сооружениях для глубокой дефосфатации сточных вод содержание значительных количеств нитратов и нитритов в условиях недостатка

кислорода может послужить причиной угнетения процесса биологического удаления фосфора.

Решением вопроса повышения содержания легкодоступных органических соединений по отношению к нитрат- и нитрит-ионам является добавление ацетата в поток поступающей на очистку воды или в зону с пониженным содержанием растворенного кислорода. Основным недостатком упомянутого решения – повышение затрат на эксплуатацию очистной станции [2]. Особенности метаболизма группы ФАО позволяют им потреблять пропионовую кислоту наряду с ацетатом в условиях недостатка растворенного кислорода. Пропионовая кислота, в свою очередь, является продуктом процесса ферментации растворенных органических соединений (сахар, этанол, метанол и пр.) в анаэробных условиях, что открывает возможности для использования этих веществ в качестве внешнего источника углерода, которые могут быть внесены в начало анаэробной зоны. [2].

Присутствие нитрат- и нитрит-ионов в зоне пониженного содержания кислорода оказывает негативное влияние на процесс биологической дефосфатации вследствие конкуренции денитрифицирующих и фосфатаккумулялирующих бактерий за субстрат. Фосфатаккумулялирующие микроорганизмы не получают преимущество перед денитрифицирующими бактериями, поскольку последние используют связанный кислород нитрат- и нитрит-ионов с целью потребления легкоокисляемых органических соединений, которые в равной степени необходимы энергетического обмена у группы ФАО. Таким образом, происходит угнетение процесса биологической дефосфатации сточных вод по причине снижения концентрации легкоокисляемых органических соединений в анаэробной зоне [2].

Возможность культивирования фосфатаккумулялирующих микроорганизмов активного ила отсутствует, если соотношение количества легкоокисляемых органических соединений по ХПК к азоту нитратов $N-NO_3$ менее 6:1 в начале анаэробной зоны и достижение анаэробных условий невозможно. Однако при увеличении данного соотношения до 9:1 так же не оказывает положительного эффекта на процесс биологической дефосфатации сточных вод в масштабах очистных сооружений [34].

1.5.6 Окислительно-восстановительный потенциал

Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП, мВ) характеризует способность химических веществ присоединять электроны. Для эффективного течения процесса биологической дефосфатации сточных вод значение ОВП должно быть менее чем - 200 мВ в условиях недостатка кислорода и существенно выше 0 мВ при повышенном содержании кислорода [2]. На рисунке 1.12 представлена изменение концентрации фосфат-ионов по фосфору в процессе очистки воды при изменении значений ОВП в анаэробной зоне [34].

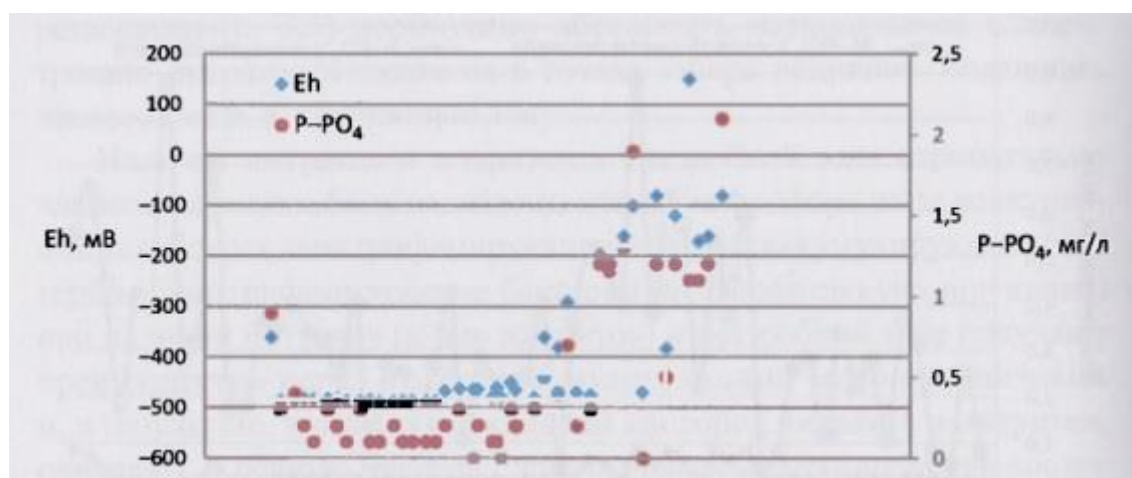


Рисунок 1.12 – Изменение концентрации фосфат-ионов по фосфору в процессе очистки воды при изменении значений ОВП в анаэробной зоне аэротенков [34]

Согласно показаниям датчика ОВП в анаэробной зоне, значения которых варьируются в пределах от 0 до 100 Мв свидетельствуют о появлении аноксидных и аэробных зон внутри анаэробной. Для предотвращения данного явления необходимо контролировать концентрации растворенного кислорода в поступающей сточной воде и рециклах в анаэробную зону и концентрацию нитрат-ионов в рецикле иловой смеси в анаэробную зону [2].

Таким образом, одним из ключевых параметров оперативного контроля снижения эффективности реализации процессов удаления фосфора в условиях эксплуатации и управления работой очистных сооружений является мониторинг

показаний датчика ОВП в анаэробной зоне аэротенка, спроектированного с целью глубокой биологической дефосфатации [34].

1.5.7 Содержание ионов металлов

При работе очистных сооружений, реализующих процессы биологической дефосфатации, показано, что ионы калия и магния повышают эффективность процессов биологического удаления фосфора. Оптимальное молярное соотношение при использовании в качестве источника углерода ацетата между фосфором фосфат-ионов, калием и магнием – 3:1:1. Наличие дополнительной преципитации по причине наличия в сточной воде кальция, железа и алюминия приводит к повышению эффективности удаления фосфатов [34].

1.5.8 Концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне

Согласно литературным данным при повышении содержания растворенного кислорода в аэробной зоне возрастают скорость роста бактерий группы фосфатаккумулялирующих микроорганизмов в аэробных условиях ($\mu_{\text{ФАО}}$) и скорость потребления фосфатов (ρ_{PO_4}) (рис. 1.13 [34]).

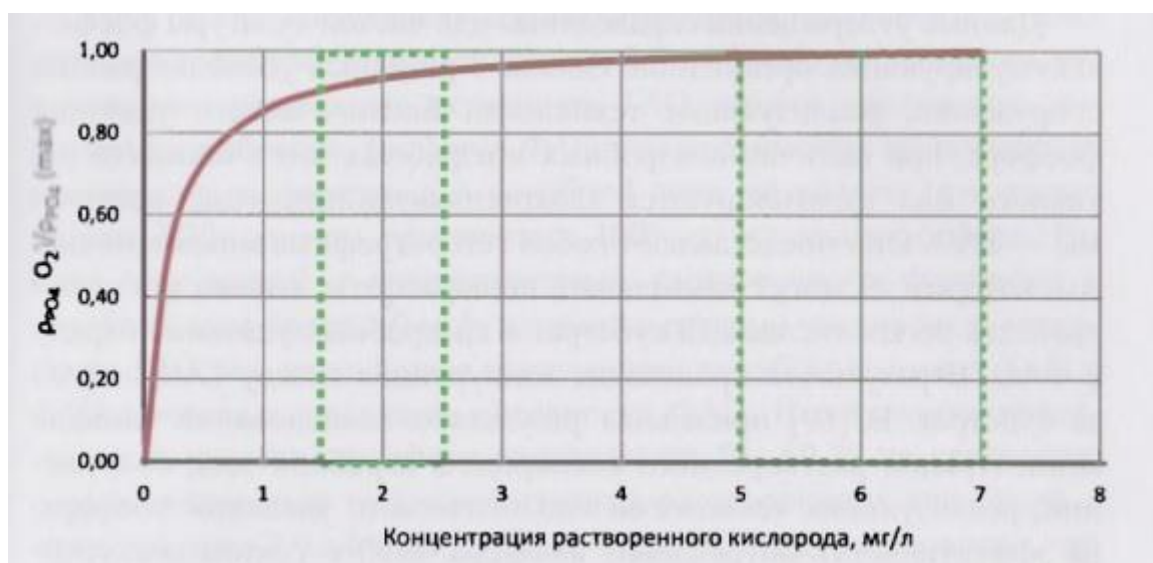


Рисунок 1.13 – Отношение скорости потребления фосфатов ФАО к максимальной скорости в аэробной зоне при изменении концентрации растворенного кислорода [34]

На рисунке 1.13 представлены отношения относительных скоростей потребления фосфатов при текущей концентрации растворенного кислорода в аэробной зоне сооружения и при максимальных концентрациях растворенного кислорода, т.е. при достигнутой равновесной концентрации (нормальные концентрации кислорода при температуре 20 °С и атмосферном давлении 760 мм рт. ст.) [2]. Скорости потребления фосфатов приближаются к максимальным уже при содержании растворенного кислорода в аэробной зоне равной 1,5 мг/дм³. При дальнейшем увеличении концентрации растворенного кислорода до значений более 2,5 мг/дм³ скорости потребления фосфат-ионов составляют более 95 % от скорости процесса при максимальных концентрациях кислорода. При достижении концентрации содержания растворенного кислорода в аэробной зоне более 5,0 мг/дм³ скорости процесса достигают максимальных значений. В литературных данных [34] также показано, что эффективность поглощения фосфатов при реализации технологий биологической дефосфатации повышается при увеличении содержания растворенного кислорода в аэробной зоне сооружения.

Результаты, приведенные на рисунке 1.13, справедливы для чистой культуры фосфатаккумулялирующих организмов. Однако в действительности при наличии анаэробных и аэробных зон в биомассе активного ила в процессе глубокой биологической дефосфатации сточных вод культивируются гликогенаккумулялирующие организмы [2]. Следствием этого является конкуренция между ГАО и ФАО за субстрат. По литературным данным [74] известны технологии, учитывающие упомянутую конкуренцию бактерий групп ФАО и ГАО за субстрат в технологиях глубокой дефосфатации сточных вод. Авторами установлено, что при концентрации растворенного кислорода в объеме узлов аэробной очистки до 2,0 мг/дм³ и значительном снижении скорости потребления фосфат-ионов из сточных вод, бактерии группы ФАО все же получают преимущество перед группой ГАО. С другой стороны, при поддержании концентрации растворенного кислорода в аэробной зоне в ходе очистки сточной воды на уровне 2,0-4,0 мг/дм³ отмечено увеличение скорости метаболизма фосфатаккумулялирующих бактерий активного ила, которое

позволило достичь максимальной эффективности удаления фосфат-ионов из сточных вод, несмотря на увеличение активности гликогенааккумулирующих бактерий [2]. Дальнейшее увеличение содержания растворенного кислорода до значений более $5,0 \text{ мг/дм}^3$ приводит к снижению скорости потребления ФАО, поскольку определяющим фактором в данных условиях является сильная конкуренция между группами ФАО и ГАО за субстрат. Таким образом, при проведении процесса биологической дефосфатации сточных вод оптимальная концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне аэротенка должна находиться в диапазоне $2,0\text{-}4,0 \text{ мг/дм}^3$ [34].

1.6 Микробиологические и биохимические аспекты фосфатаккумуляции в процессе очистки сточных вод

Определенные группы бактерий активного ила обладают способностью накапливать в своих клетках в полифосфатных гранулах, так называемых зернах волютина растворенные формы фосфора, т.е. откладывать в запас для последующего потребления. Таким образом, эти бактерии способны потреблять фосфора больше, чем его требуется на прирост биомассы и энергетические потребности. В литературе при описании фосфорнакапливающих бактерий, в основном, упоминается р. *Acinetobacter*, однако таких бактерий в активном иле довольно много. Это широко распространенные рода *Pseudomonas*, *Aerobacter*, *Beggiatoa*, *Aeromonas*, *Ca. Accumulibacter*, *Tetrasphaera*, *Dechloromonas*, а также *E. coli*, *Zoogloea ramigera*. Реже встречаются бактерии р. *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Moraxella*, *Mycobacterium* и многие другие [76].

Так, *Acinetobacter calcoaceticus* накапливает в аэробных условиях $0,4\text{-}0,5$ ммоль/г сухой массы клетки за 1 ч и в анаэробных условиях выделяет за 1 ч $0,015$ ммоль/г сухой массы клетки [60]. Бактерии р. *Acinetobacter* – грамотрицательные бактерии из семейства *Moraxellaceae*. Обычно очень короткие и округлые, размеры бактерий в логарифмической фазе роста составляют $1,0\text{-}1,5 \times 1,5\text{-}2,5$ мкм. В стационарной фазе роста они приобретают преимущественно форму кокков,

располагающихся парами или в виде коротких цепочек (рис. 1.14) [77]. Большие непостоянной формы клетки и нити обнаруживаются в небольшом количестве во всех культурах, а иногда и преобладают. Спор не образуют, жгутиков не имеют, однако некоторые штаммы на плотной питательной поверхности демонстрируют «дергающуюся» подвижность. Капсулы и фимбрии могут быть, но могут и отсутствовать.

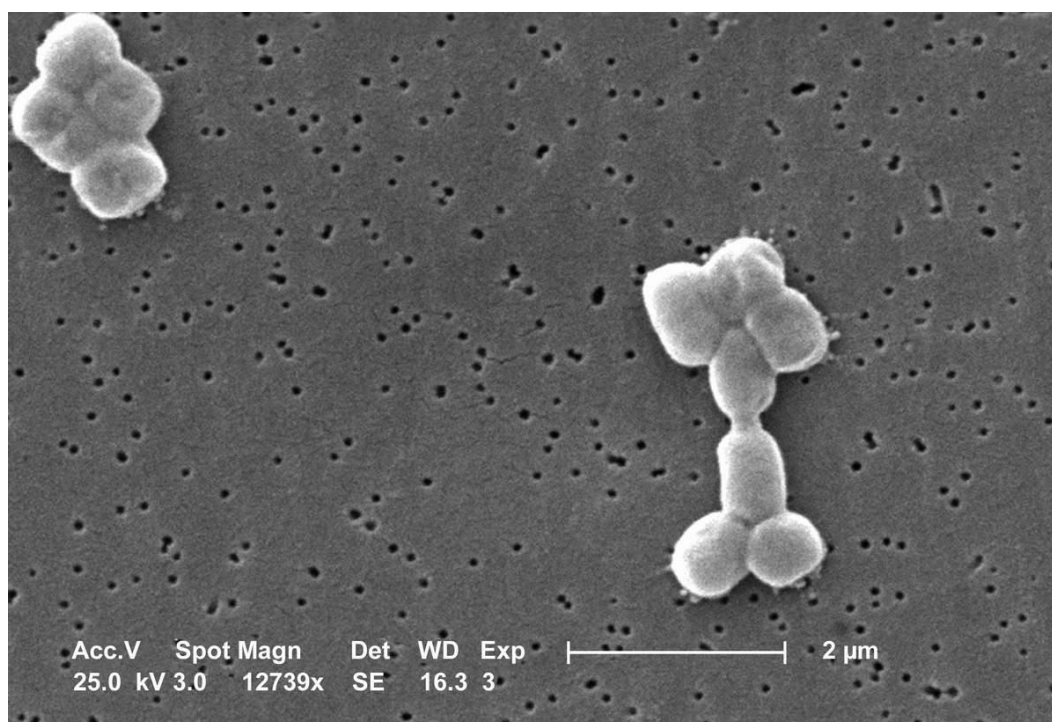


Рисунок 1.14 – Морфология *Acinetobacter calcoaceticus* [77]

Ацинетобактерии являются хемоорганотрофами с окислительным метаболизмом. Способность использовать органические соединения в качестве источников энергии и углерода непостоянна. Ацетоин, индол, сероводород, оксидазу не образуют, каталазопозитивны. Строгие аэробы, оптимальная температура для роста 30-32 °С, рН около 7,0 единиц. Обычно резистентны к пенициллину [76].

Культуры р. *Acinetobacter* являются свободно живущими сапрофитами, распространены повсеместно. Могут быть причиной многих инфекционных процессов, включая менингиты и септицемии у людей, а также септицемии и аборты у животных [76].

Помимо бактерий р. *Acinetobacter* фосфатаккумулялирующей способностью обладают бактерии р. *Pseudomonas*. Представители рода *Pseudomonas* являются грамотрицательными подвижными палочковидными бактериями размером 0,7-0,8 × 2,3-2,8 мкм (рис.1.15) [77] с несколькими (от 2 до 4) жгутиками [78].



Рисунок 1.15 – Морфология *Pseudomonas fluorescens* [77]

У представителей р. *Pseudomonas* чрезвычайно гибкий метаболизм. Они могут обитать в воде и почве. Являются облигатными аэробами, но некоторые штаммы в процессе клеточного дыхания способны использовать нитраты вместо кислорода в качестве конечного акцептора. Оптимальная температура для роста *P. fluorescens* составляет от 25 до 30 °С. Даёт положительные результаты в тесте на оксидазу. Также является несакхаролитической бактерией.

Также к группе фосфатаккумулялирующих относятся бактерии *Ca. Accumulibacter phosphatis*. Несмотря на доминирующую роль данных микроорганизмов в процессах удаления фосфат-ионов из сточных вод за счет фосфатаккумуляции [79], они относятся к некультивируемым видам. В связи с этим изучение метаболизма данных бактерий проводят в сообществах с помощью метагеномных исследований. В реакторах глубокого для удаления биогенных

элементов возможно обогащение лабораторного сообщества бактериями *Ca. Accumulibacter phosphatis* до 80 % [80].

Другим представителем фосфатаккумулирующих микроорганизмов в активных илах очистных сооружений является р. *Tetrasphaera*. Представители рода являются грамположительными неподвижными кокковидными бактериями, размером 0,4-1,1 мкм (рис.1,16), не образуют спор [81].

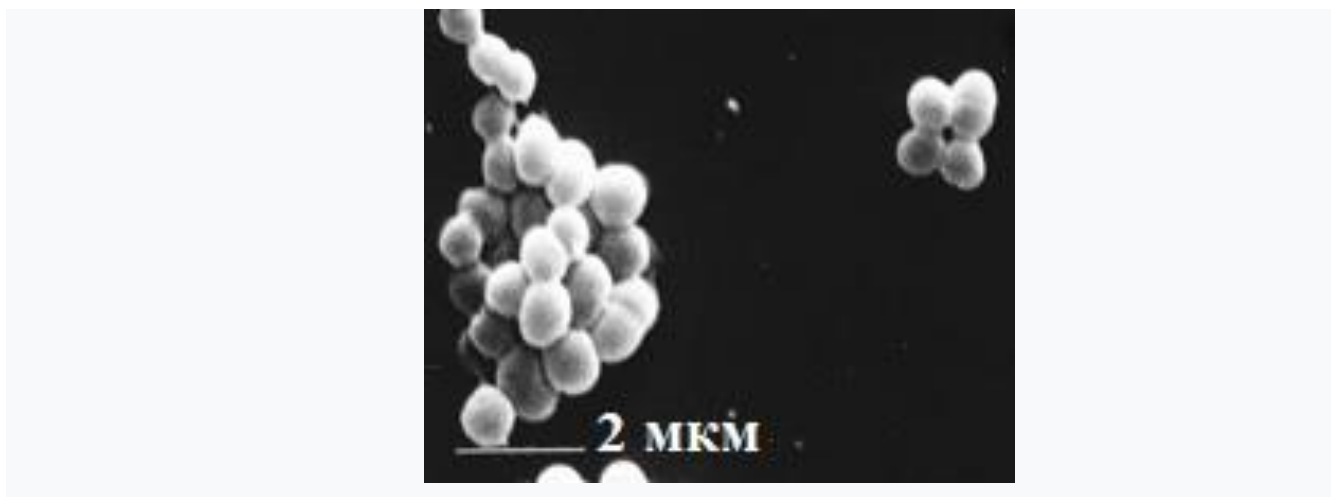


Рисунок 1.16 – Морфология бактерий р. *Tetrasphaera* [81]

Эта группа бактерий постоянно обнаруживается в большом количестве биомассы активных илов (до 35 %) сооружений глубокой очистки от биогенных элементов. По сравнению с *Ca. Accumulibacter*, р. *Tetrasphaera* способны лучше усваивать сложные органические молекулы, такие как аминокислоты и/или глюкоза, несмотря на отсутствие запасов ПГА. Более того, в анаэробных условиях некоторые представители р. *Tetrasphaera* способны выделять ЛЖК посредством ферментации, что может служить дополнительным источником углерода для процесса глубокого удаления фосфора [82].

Кроме того, установлено, что денитрифицирующие бактерии также способны накапливать полифосфаты в составе метакроминовых гранул. Все указанные бактерии отличаются от других микроорганизмов активного ила тем, что аккумуляция соединений фосфора в их клетках составляет значительную величину – от 1 до 3 % сухой массы тела [83].

К примеру, способностью к фосфатаккумуляции обладают представители р. *Dechloromonas*. Они представлены грамтрицательными палочковидными клетками размером 0,8-1,2 мкм (рис.1.17), являются факультативными анаэробами.

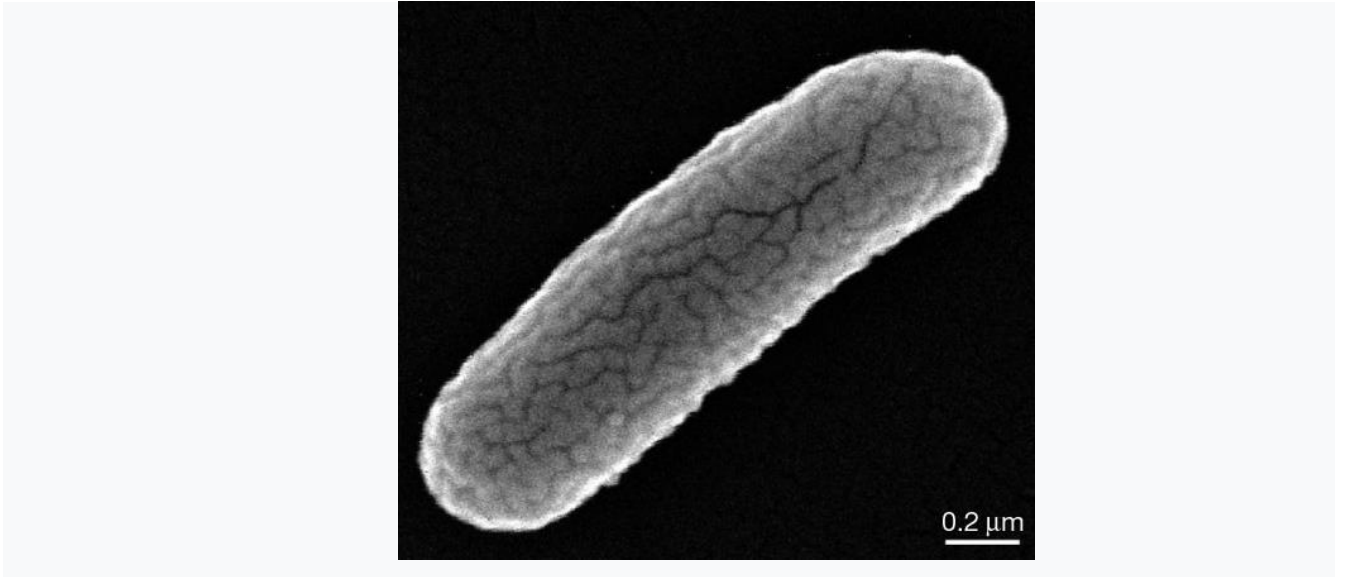
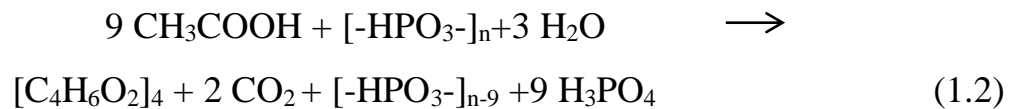


Рисунок 1.17 – Морфология бактерий р. *Dechloromonas* [84]

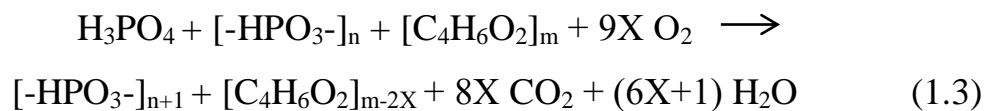
В последние годы *Dechloromonas* постоянно обнаруживалась в высоких количествах на многих станциях глубокой очистки сточных вод от биогенных элементов во всем мире. Виды *Dechloromonas*. первоначально были выделены как бактерии, разлагающие ароматические соединения, и факультативно-анаэробные нитратредуцирующие бактерии. Однако несколько популяций *Dechloromonas* накапливают полифосфаты и ПГА в условиях *in situ*, что дает основание предполагать их потенциальную роль в качестве ФАО. Кроме того, анализ генома штамма *Dechloromonas aromatica* выявил гены, необходимые для накопления полифосфатов, включая полифосфаткиназу и экзополифосфатазу. Виды *Dechloromonas*. играют важную роль в круговороте азота на полномасштабных установках по глубокому удалению биогенных элементов, поскольку некультивируемые виды р. *Dechloromonas* обладают способностью дышать кислородом, связанным в нитритах и нитратах в условиях *in situ*, что дает основание отнести их к группе денитрифицирующих ФАО [84].

Для успешного протекания биологической дефосфатации сточных вод процесс очистки должен быть организован таким образом, чтобы способствовать росту фосфатаккумулирующих организмов в биоценозе активного ила. Прежде всего, следует отметить, что в анаэробных условиях ФАО преобразовывают легкодоступные органические вещества, например, ЛЖК в углеродные компоненты – полигидроалканаты (ПГА):



ФАО используют энергию, получаемую в процессе распада молекул полифосфата, чтобы создать ПГА. Этот распад происходит при выделении фосфора [85].

В аэробных условиях культивирования ФАО используют энергию запасенных ПГА для трансформации фосфора, который был высвобожден в виде фосфат-ионов в анаэробной зоне, а также в виде фосфатов в составе среды с образованием внутриклеточных полифосфатных гранул:



Таким образом, снижение концентрации фосфатов в биологически очищенной воде сопровождается накоплением полифосфатов в клетках культур активного ила [86].

Если растворенный кислород присутствует в анаэробной зоне, гетеротрофные аэробные организмы могут использовать кислород как акцептор электронов и будут конкурировать с ФАО за ЛЖК. Это приведет к меньшему количеству запасенных ЛЖК и впоследствии к уменьшению количества биологически удаленного фосфора. Кроме того, если кислород доступен, ФАО могут полностью метаболизировать ЛЖК и использовать полученную энергию и углерод для роста, вместо того, чтобы запасенные ЛЖК использовали энергию из полифосфатных связей для последующего поглощения фосфатов. Если ФАО используют кислород для метаболизации ЛЖК, они не высвобождают фосфор в

анаэробной зоне в процессе запасаения ЛЖК, и они не абсорбируют избыточный фосфор в аэробной зоне.

Наличие нитратов в анаэробной зоне исчерпает количество ЛЖК, доступных для ФАО, так же, как наличие растворенного кислорода. Нитраты могут так же ингибировать ферментацию ХПК и понизить образование ЛЖК, потому что большинство ферментирующих микроорганизмов являются факультативными и могут использовать нитрат как акцептор электронов, чтобы полностью окислить ХПК вместо того, чтобы произвести ЛЖК как конечный продукт.

ФАО нуждаются в кислороде, чтобы усвоить запасенные продукты и аккумулировать фосфор в аэробной зоне. Поддержание достаточно высокой концентрации кислорода в аэробной зоне (более 2,0 мг/дм³) усиливает стабильность процесса и является ключевым фактором в удалении фосфора [87]. Таким образом, удаление фосфора может быть улучшено путем увеличения концентрации растворенного кислорода в иловой смеси. Одновременно повышенная аэрация может быть полезна, чтобы гарантировать наличие достаточного растворенного кислорода в иловой смеси во вторичных отстойниках, чтобы предотвратить выделение фосфора во время осаждения.

Выделение фосфора в анаэробной зоне – существенный шаг биологического удаления фосфора, потому что ФАО поглощают и запасают ЛЖК в виде ПГА и других компонентов. Однако выделение фосфора может произойти по таким причинам, как низкий рН, химическая токсичность, и чрезмерное анаэробное дыхание вследствие деструкции клеток ФАО. Таким образом, выделение фосфора может также произойти в отсутствии источника ЛЖК. Например, часть энергии, запасенной в виде полифосфатов, используется для строительства клетки, и фосфор выделяется в жидкой фазе. Если ФАО выделяют фосфор, не запасая ЛЖК, у них не будет достаточной энергии для удаления всего выделившегося фосфора в аэробной зоне.

Если ФАО войдут в аэробную зону с неадекватным ПГА, то у них не будет энергии, необходимой для полного поглощения фосфора, и эффективность

удаления фосфора уменьшится. Это может произойти на следующих стадиях процесса:

- в анаэробной зоне, если гидравлическое время пребывания является слишком большим и ЛЖК исчерпываются до окончания времени пребывания;
- в основной аноксидной зоне, если нитраты исчерпаны задолго до конца гидравлического времени пребывания (ГВП);
- во второй аноксидной зоне, если в ней нет нитратов, которые должны быть удалены;
- в слоях осадка вторичных отстойников, если скорость откачки слишком низка и ил не удаляется достаточно быстро, в результате чего выделившиеся фосфаты уходят с потоком очищенной воды через водослив.

Вторичное выделение может также происходить в аэробных зонах, которые являются слишком большими, вследствие истощения запасенного субстрата и деструкции клеток ФАО путем эндогенного метаболизма. Далее чрезмерное истощение в аэробной зоне запасенного гликогена в ФАО будет уменьшать запас ЛЖК и выделение фосфора в анаэробной зоне, что приведет к снижению удаления фосфатов системой биологического удаления фосфора.

Успешность биологического удаления фосфора сильно зависит от достижимости ЛЖК в анаэробной зоне. ЛЖК продуцируются ферментацией городских сточных вод, которые могут произойти в канализационных сетях или непосредственно в анаэробной зоне. Если ЛЖК не присутствуют в достаточном количестве, необходимо рассмотреть добавление ЛЖК путем использования локальной ферментации осадка или органических добавок, например, метанола [88].

1.7 Технологические особенности биологического удаления фосфатов из сточных вод

В основе процессов биологической очистки сточных вод лежит биохимическое окисление органических загрязнений микроорганизмами активного ила в аэробных или анаэробных условиях. Участвуя в конструктивном

и энергетическом обмене живой клетки, органические вещества сточных вод претерпевают сложные химические и биологические превращения. В результате катаболических процессов происходит распад этих веществ с образованием более простых органических низкомолекулярных соединений, часть которых подвергается дальнейшему окислению до углекислого газа и воды с выделением энергии или превращается в продукты метаболизма, а другая часть используется для биосинтеза в процессах анаболизма [89].

Наиболее часто используется схема, приведенная на рисунке 1.18 [90].

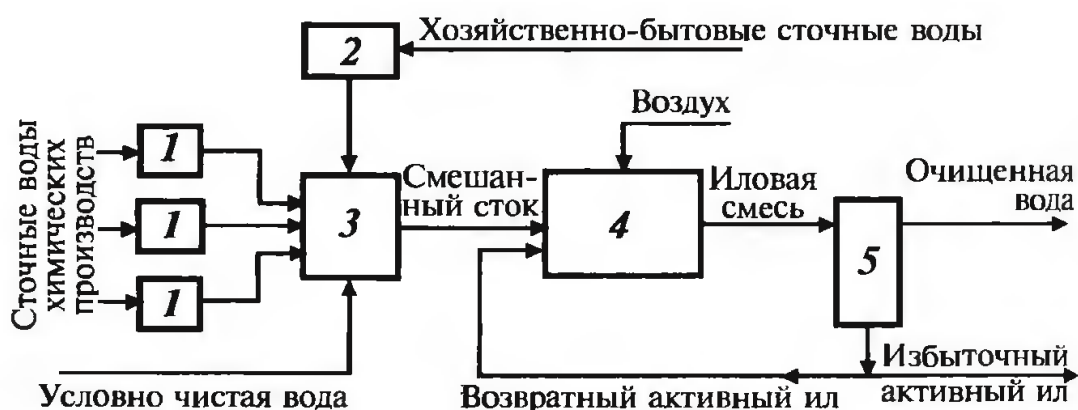


Рисунок 1.18 – Принципиальная схема биологической очистки сточных вод (1 – усреднительные емкости, 2 – накопитель хозяйственно-бытовых сточных вод, 3 – смесительная камера, 4 – аэротенк, 5 – вторичный отстойник) [90]

Сточные воды поступают первоначально в усреднительные емкости 1, а затем в смесительную камеру 3. Сюда же поступают хозяйственно-бытовые сточные воды из накопителя 2, а также условно чистая вода. Накопитель хозяйственно-бытовых сточных вод 2 играет роль усреднителя, поскольку эти воды имеют переменный характер загрязнения. Смешанный сток поступает в аэротенк 4, куда подается воздух. Иловая смесь из аэротенка направляется во вторичный отстойник 5, где очищенная вода отделяется от активного ила и направляется в водоем или на подпитку водотборных систем (после соответствующей доочистки). Активный ил из вторичных отстойников

возвращается в аэротенк в виде возвратного ила, а частично в виде избыточного ила направляется на обработку [90].

В технологии биологической очистки сточных вод наибольшее применение получил аэробный метод. Несмотря на длительный опыт применения этого метода, он продолжает совершенствоваться, разрабатываются новые типы сооружений и модифицируются известные конструкции. В новых разработках заметна тенденция развития комбинированных сооружений, принцип действия которых совмещает ряд технологических процессов (например, аэротенки-отстойники и т.п.) [79].

В случаях использования вышеприведенной схемы возможно увеличение содержания фосфатов в очищенных водах в тех сооружениях биологической очистки, где обеспечивается хорошая нитрификация. Это объясняется способностью фосфораккумулирующих бактерий выделять фосфат-ионы в анаэробных условиях вторичных отстойников. Причем, чем эффективнее проходит процесс нитрификации в аэротенках, тем больше накапливается фосфатов в клетках микроорганизмов активного ила, и тем больше они высвободят его во вторичных отстойниках. Отсюда следует, что для нормального проведения процесса фосфатаккумуляции в системе с активным илом требуются, чтобы были аэробные, анаэробные, аноксидные зоны. Оптимальное соотношение этих зон позволяет достичь очень высоких показателей качества очистки одновременно от соединений углерода, азота и фосфора.

Основной технологией биологического удаления фосфора является процесс Форедокс (A/O) [71,87]. A/O – процесс является обычной системой активного ила с анаэробной зоной на входе аэротенка. Схема процесса представлена на рисунке 1.19 [88].

Возвратный ил перекачивается из вторичного отстойника в анаэробную зону. Это процесс с малым возрастом ила, чтобы избежать нитрификации. Без нитратов в возвратном иле процесс достигается и легко осуществляется, если температура иловой смеси выше 25 °С, когда нитрификацию трудно избежать. Если нитраты присутствуют в рецикле ила, анаэробная зона может быть

разделена на анаэробную зону для денитрификации нитратов и одну или более анаэробных зон для биологического удаления фосфора.

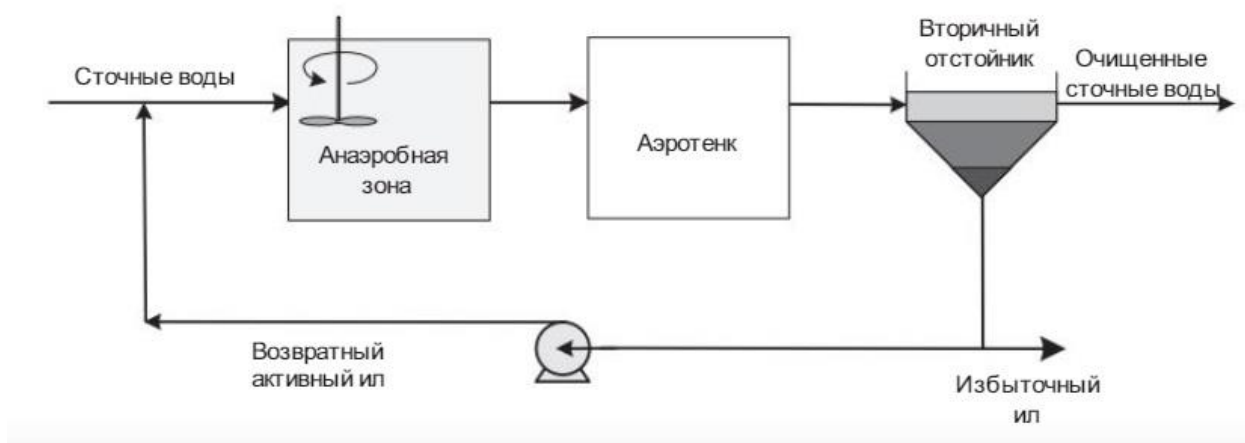


Рисунок 1.19 – Биологическое удаление фосфора A/O (Форедокс) [88]

Недостатком этой схемы является денитрификация лишь незначительного количества нитратов и нитритов, образованных в процессе нитрификации, которые возвращаются в начало сооружения в составе рециркулирующего активного ила. Поэтому эффективность денитрификации, на наш взгляд, будет невысокой. Кроме того, NO_2 и NO_3 в составе обратного активного ила ингибируют процесс дефосфатации. Эффект удаления соединений фосфора в приведенной схеме достигает 70 % [90].

Технологию относительно легко внедрить в существующих аэротенках путем установки перегородки с водосливом между зонами и смесителей в анаэробной зоне. Аэраторы в аэробной зоне нужно перераспределить, таким образом, чтобы их количество увеличивалось в конце аэротенка.

В классическом варианте схема A/O не может быть использована при ретехнологизации ОС городской канализации, так как предполагает отсутствие нитрификации. Однако основные принципы этой схемы используются в системах совместного удаления соединений азота и фосфора [88].

Схема процесса AA/O или A2/O (Anaerobic Anoxic/Oxic) (в некоторых странах она имеет название Phoredox modification) состоит из анаэробной,

аноксидной и аэробной зон с рециркуляцией иловой смеси (100-300 % [91]; 50 % [92]) из конца аэробной зоны в начало аноксидной (рис. 1.20) [88].

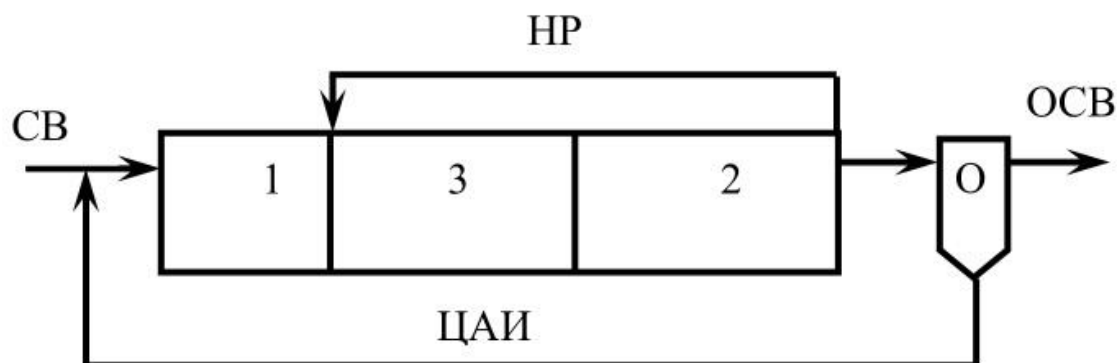


Рисунок 1.20 – Схема удаления фосфора и азота в аэротенке с анаэробной, аноксидной и аэробной зонами (АА /О (А2/О)): СВ – сточные воды, которые поступают в сооружение; 1 – анаэробная зона (имеет место при отсутствии в жидкости как растворенного кислорода, так и связанного кислорода нитритов и нитратов); 2 – аэробная зона (создается при аэрации смеси (если в жидкости присутствует растворенный кислород)); 3 – аноксидная зона (обуславливается присутствием нитритов и нитратов и отсутствием молекулярного кислорода); ИР – нитратный рецикл; ЦАИ – циркуляционный активный ил; О – вторичный отстойник; ОСВ – очищенные сточные воды [88]

Испытание такой схемы проводилось на исследовательской производственной установке Красносельской станции аэрации г. Санкт-Петербург производительностью до 3600 м³/сутки [90]. Технологические параметры схемы А2/О – процесса и результаты испытаний приведены в таблице 1.2 [92] (в скобках даны технологические показатели схемы процесса АА/О, соответствующие качественным показателям выходной сточной воды, полученным в результате экспериментов на опытной установке и приведенным в нижней половине таблицы) [93,94].

Таблица 1.2 – Технологические параметры схемы процесса АА/О [92]

Технологический показатель	Сточная вода	
	вход	выход
Нагрузка по илу, гБПК ₅ /г б.в. сутки	0,15-0,25	
Возраст ила, сут	4-27 (10-15)	
Доза ила, г/дм ³	2-4 (2,1-2,5)	
Прирост ила, г/м ³	(0,03-0,06)	
Иловый индекс, см ³ /г	(90-120)	
Зоны:	ч	%
анаэробная	0,5-1,5	11-18
аноксидная	0,5-1,0	11-15
аэробная	3,5-6,0	70-78
Время пребывания, ч	4,5-8,5	
Рецикл ила, %*	20-50 (50)	
Нитратный рецикл, %*	100-300 (50)	
Взвешенные вещества, мг/дм ³	40-60	<5
БПК ₅ , мг/дм ³	30-60	3-3,2
ХПК, мг/дм ³	130-150	30-60
ХПК (фильтрованная проба), мг/дм ³	70-80	30-50
N _{общ} , мг/дм ³	15-16	5-6
N _{общ} (фильтрованная проба), мг/дм ³	11-13	5-6
N-NH ₄ , мг/дм ³	10-12	0,2-0,3
P _{заг} , мг/дм ³	2-2,6	1,2-1,4
P _{заг} (фильтрованная проба), мг/дм ³	1,3-1,6	1,2-1,4

* В процентах от расхода сточной воды, поступающей на очистку.

Поскольку фосфаты и нитраты осуществляют взаимное ингибирующее влияние в анаэробной зоне (субстратом для обеих групп бактерий являются органические соединения небольшой молекулярной массы), возникает необходимость в удалении нитратов из рециркулирующего активного ила [90]. Такой вариант схемы был разработан Кейптаунским университетом и получил название UCT (University of Cape Town) – процесс [92-95] (рис. 1.21).

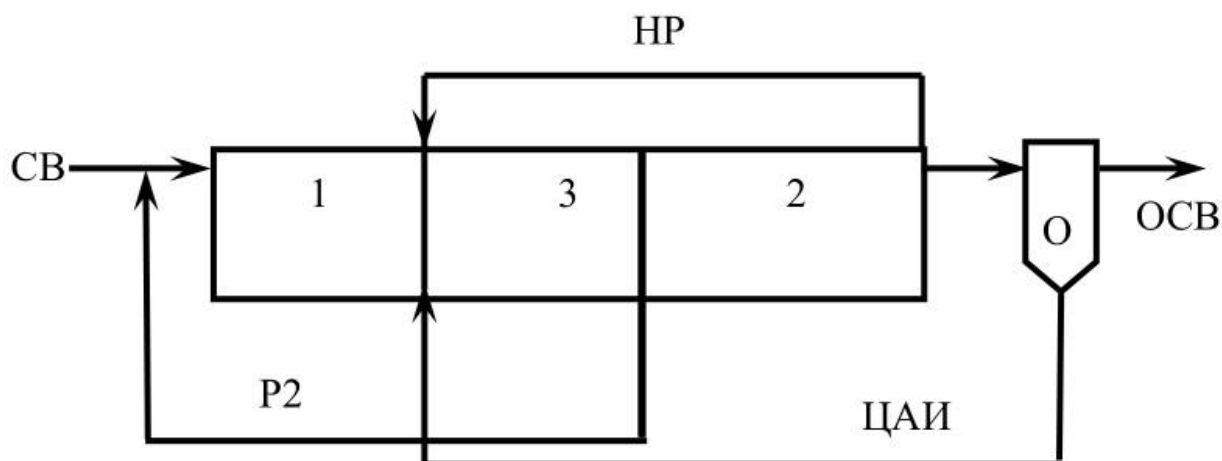


Рисунок 1.21 – Схема процесса УСТ (СВ – сточные воды, которые поступают в сооружение; 1 – анаэробная зона (имеет место при отсутствии в жидкости как растворенного кислорода, так и связанного кислорода нитритов и нитратов); 2 – аэробная зона (создается при аэрации смеси (если в жидкости присутствует растворенный кислород)); 3 – аноксидная зона (обуславливается присутствием нитритов и нитратов и отсутствием молекулярного кислорода); P2 – рециркуляция денитрифицированной иловой смеси в анаэробную зону; НР – нитратный рецикл; ЦАИ – циркуляционный активный ил; О – вторичный отстойник; ОСВ – очищенные сточные воды) [92]

По этой схеме циркулирующий активный ил направляется в аноксидную зону, где осуществляется частичная денитрификация, и дальше, с помощью рецикла P2 перекачивается в анаэробную зону. В аноксидную зону возвращаются нитраты из аэробной с рециклом НР [92].

В дальнейшем схема была усовершенствована за счет деления аноксидной зоны на две части. Схема процесса модификации УСТ показана на рисунке 1.22 [93, 95-98].

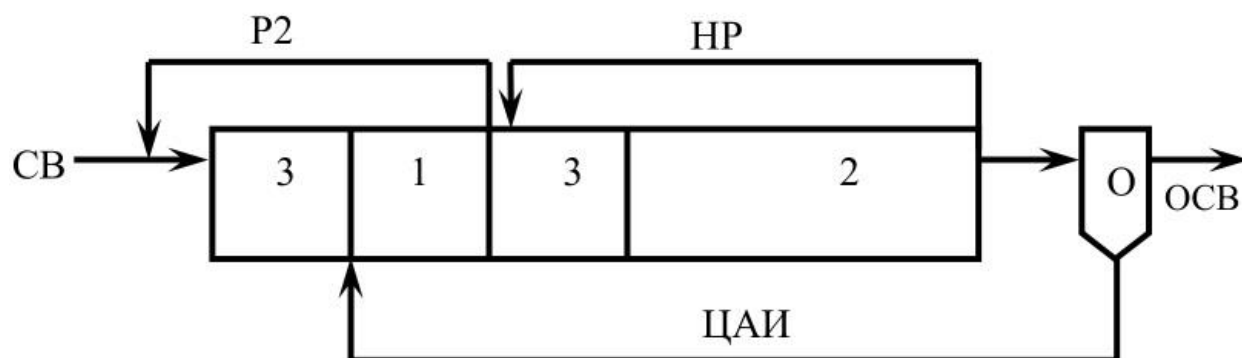


Рисунок 1.22 – Схема процесса МУСТ (СВ – сточные воды, которые поступают в сооружение; 1 – анаэробная зона (имеет место при отсутствии в жидкости как растворенного кислорода, так и связанного кислорода нитритов и нитратов); 2 – аэробная зона (создается при аэрации смеси (если в жидкости присутствует растворенный кислород)); 3 – аноксидная зона (обуславливается присутствием нитритов и нитратов и отсутствием молекулярного кислорода); P2 – рециркуляция денитрифицированной иловой смеси в анаэробную зону; НР – нитратный рецикл; ЦАИ – циркуляционный активный ил; О – вторичный отстойник; ОСВ – очищенные сточные воды) [92]

По этой схеме циркулирующий активный ил (ЦАИ) направляется в первую аноксидную зону, где осуществляется удаление нитратов из иловой смеси (денитрификация ила). Далее ил, лишенный значительного количества нитратов перекачивается в анаэробную зону, в которой происходит освобождение фосфора без ингибирующего влияния нитратов. Вторая аноксидная зона служит денитрификатором нитритов и нитратов, которые возвращаются в составе иловой смеси из аэробной части [93].

При реконструкции аэротенков путем внедрения вышеописанных схем следует учитывать тот факт, что вытеснение и следующее избыточное потребление фосфора начинается при концентрации в анаэробной зоне биоразлагаемых органических примесей по ХПК выше 25 мг/дм^3 [92].

Таким образом, актуальность темы исследований определяется необходимостью предотвращения процесса эвтрофирования водных объектов

растворимыми соединениями фосфора вследствие эффективной дефосфатации сточных вод, которые являются основным источником поступления фосфора в природные водоемы.

В качестве методов дефосфатации сточных вод могут быть применены физико-химические и биологические методы. Последние представляют особый интерес, поскольку отличаются экологичностью. Биологическая дефосфатация осуществляется за счет микроорганизмов активного ила, в особенности, фосфатаккумулялирующих бактерий. Отличительные черты их метаболизма позволяют извлечь значительное количество фосфат-ионов в условиях смены аэробной и анаэробной зон.

Технологические схемы, направленные на повышение эффективности дефосфатации, основаны на создании условий чередования кислородных режимов, благоприятных для фосфатаккумулялирующих бактерий. Однако на процесс фосфатаккумуляции могут повлиять такие факторы как концентрация растворенного кислорода, органических веществ, нитрит- и нитрат-ионов, активная реакция среды, температура и т.д., поэтому организация успешной дефосфатации в масштабах очистных сооружений требует повышенного внимания.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные исследования включали в себя следующие этапы:

- теоретический расчет эффективности биологической дефосфатации в процессе микробной фосфатаккумуляции;
- выделение изолятов фосфатаккумулялирующих микроорганизмов из активного ила и идентификация перспективных микробных культур;
- исследование процесса фосфатаккумуляции в процессе периодического культивирования выделенных изолятов; оценка фосфатаккумулялирующей способности выделенных изолятов;
- оценка влияния внешних факторов среды на эффективность дефосфатации сточных вод на основании данных производственной лаборатории очистных сооружений;
- проведение опытно-промышленных испытаний по интенсификации процесса биологической дефосфатации сточных вод путем чередования кислородных режимов.

2.1 Объекты исследования

Объектами исследований на различных этапах выполнения экспериментальных исследований выступали изоляты фосфатаккумулялирующих микроорганизмов, выделенные из сообщества активного ила очистных сооружений АО «Чистополь-Водоканал» г. Чистополь, Республика Татарстан; сточная вода, активный ил, лабораторные данные очистных сооружений АО «Зеленодольск-Водоканалсервис» (ЗВКС), г. Зеленодольск, Республика Татарстан; сточная вода и активный ил биологических очистных сооружений «Биотехинжиниринг» (БТИ-БОС) с. Коцаково Пестречинского района, Республика Татарстан. Все очистные сооружения, рассмотренные в работе, осуществляют очистку сточных вод преимущественно коммунально-бытового характера, что дает основание считать сообщества активных илов указанных

сооружений, формирующимися в процессе очистки близких по составу сточных вод, схожими по микробному составу.

2.2 Методы исследования

2.2.1 Выделение изолятов из сообщества активного ила

Выделение изолятов из сообщества активного ила очистных сооружений проводили высевом разведенной надильной жидкости по методу Коха на плотные питательные среды следующего состава (на 1 л): глюкоза – 10 г, NaNO_3 – 3 г, K_2HPO_4 – 1 г, KH_2PO_4 – 0,5 г, MgSO_4 – 0,5 г, KCl – 0,5 г, FeSO_4 – 0,001 г, дрожжевой экстракт – 0,5 г, агар–агар – 20 г [96]. Инкубация культур осуществлялась в термостате при 37 ± 1 °С в течение 24-72 ч.

2.2.2 Описание культурально-морфологических свойств изолятов

Оценка культурально-морфологических свойств выделенных изолятов проводилось по таким признакам как размеры бактериальных клеток, подвижности, наличию спор, окраски по Граму [97], размеру, цвету и форме колоний [98].

2.2.3 Исследование процесса фосфатаккумуляции

Исследование процесса фосфатаккумуляции осуществлялось по принятой методике [99] с проведением периодического культивирования накопительных культур изолятов в жидкой модельной питательной среде следующего состава (на 1 л): пептон – 0,27 г, KH_2PO_4 – 0,028 г, NaCl – 0,007 г, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 0,004 г, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,002 г, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 0,1 г, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 0,2 г, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 0,1 г, $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 0,02 г, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 0,0026 г.

Культивирование проводилось в качалочных колбах объемом 500 см³. Для организации аэрации использовались компрессор BARBUS SB-348А, воздушные

фильтры Sartorius Midisart 2000 с размером пор 0,2 мкм, способные выдержать до 20 циклов автоклавирования, для обеспечения стерильности процесса.

2.2.4 Определение количества биомассы

Определение количества биомассы в процессе исследования фосфатаккумуляции выделенными изолятами осуществлялось по методу Коха [100] с высевом на мясопептонный агар образцов культуральной жидкости сразу после внесения инокулята в систему периодического культивирования, а также по окончании культивирования.

2.2.5 Определение физико-химических параметров в процессе культивирования изолятов и активного ила

Эффективность процесса дефосфатации контролировали по содержанию фосфатов в питательной среде в процессе культивирования. Определение фосфат-ионов производилось по стандартной методике [101].

На основании литературных данных для оценки влияния внешних факторов определялись концентрации органических веществ по ХПК и БПК₅, ионов аммония, нитрит- и нитрат-ионов, доза ила по стандартным методикам [102-107], а также контролировались значения pH с использованием анализатора pH-150 МИ.

Концентрация растворенного кислорода определялась оксиметром ULAB UP-70410, а также арбитражным методом по Винклеру [108].

2.2.6 Оценка образования внутриклеточных полифосфатных гранул

В процессе экспериментальных исследований наличие полифосфатных гранул определялось путем окрашивания клеток бактерий раствором щелочного метиленового синего (по Леффлеру) и последующего светлопольного микроскопирования [109]. Микроскопирование осуществлялось с использованием

микроскопов «LEVENHUK» (США) и Axio Imager (Carl Zeiss, Германия). Цифровой анализ микрофотографий с подсчетом количества клеток, содержащих полифосфатные гранулы, осуществлялось с помощью программного обеспечения Image Pro Plus.

2.2.7 Идентификация бактериальных изолятов

Полноразмерный фрагмент гена 16S рРНК был амплифицирован с помощью праймеров 27fm (5'- AGA GTT TGA TCM TGG CTC AG -3') и 1522R (5'- AAG GAG GTG ATC CAG CCG CA -3'). Для получения лизата биомассу культуры количеством со спичечную головку собирали с поверхности чашки Петри и ресуспендировали в 100 мкл воды. Суспензию замораживали при -80 °С в течении 20 минут, а затем прогревали при 95 °С в течении 5 минут. Суспензию центрифугировали при 13000 об/минуту в течение 5 минут. Надосадочную жидкость использовали в качестве матрицы для ПЦР. Для амплификации готовили смесь объемом 50 мкл, которая содержала x1 буфера для Taq-полимеразы, 0,2 мМ всех четырех нуклеотидов, 1 рМ/мкл каждого из праймеров, 10 мкл лизата культуры, полученного как описано выше, 5 единиц HS Taq-полимеразы. Реакцию проводили в следующем режиме: смесь прогревали до 95 °С в течение 3 минут для активации полимеразы, затем проводили 30 циклов в режиме 95 °С в течение 10 секунд, 54 °С в течение 20 секунд и 72 °С в течение 1 минуты. Для достройки фрагментов смеси выдерживали еще 5 минут при 72 °С [110].

Полученный фрагмент разгоняли в агарозном геле (1 %) в буфере 0,5xTBE и очищали из геля с помощью набора CleanUp Mini (ЗАО «Евроген», Москва, РФ). Определение нуклеотидной последовательности производили в компании ЗАО «Евроген» (Москва, РФ) с праймерами 27fm и 1522R (5'- AAG GAG GTG ATC CAG CCG CA -3'). Последовательности объединяли с помощью программы Clon Manager 9.0 (США) и анализировали в системе «BLAST» (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov>). Штамм идентифицировали по наибольшему

совпадению последовательностей со штаммами известных видов в коллекции GenBank.

2.2.8 Оценка внутриклеточного накопления фосфора методом электронной микроскопии с элементным анализом

Для подтверждения внутриклеточного накопления фосфора был использован метод электронной микроскопии с элементным анализом. Электронно-микроскопические исследования препаратов проводили на микроскопе Merlin (Carl Zeiss, Германия). Подготовка препаратов и фиксация клеток 2,5%-ным раствором глутарового альдегида проводилась по методике, описанной ранее [111]. Особое внимание было уделено отмывке бактериальных клеток от питательной среды, поскольку в ней содержатся фосфат-ионы, способные повлиять на определение количества элементного фосфора в исследуемой пробе.

2.2.9 Оценка состояния активного ила по индексам биоразнообразия

Метод оценки состояния активного ила основан на расчете индексов биоразнообразия. Для этого подсчитывается количество простейших микроорганизмов в препарате «раздавленная капля». На основании данных о количестве живых организмов рассчитываются индексы Шеннона, Куба и Маргалефа, а также определяются доминирующие группы для индикации стрессового влияния [112].

2.3 Постановка эксперимента

2.3.1 Изучение фосфатаккумуляционной способности изолятов активного ила

Выделение изолятов из сообщества активного ила осуществлялось высевом надиловой жидкости, разбавленной в 10^5 - 10^{12} раз (п. 2.2.1). Выделенные культуры идентифицировались на основании культуральных и морфологических признаков (п. 2.2.2).

На начальном этапе работы с культурами фосфатаккумуляционных бактерий был проведен расчет теоретически возможной эффективности удаления фосфат-ионов изолятами на основании материального баланса процесса микробной фосфатаккумуляции. Обработка результатов производилась с использованием процедур статистического анализа пакета программ MS Office Excel.

После определения потенциально возможной эффективности дефосфатации за счет микробной фосфатаккумуляции все полученные изоляты культивировались на модельной питательной среде (см. п. 2.2.3).

Поскольку модельная среда для развития фосфатаккумуляционных микроорганизмов имеет отличный состав от среды для выделения изолятов, перед проведением эксперимента было необходимо адаптировать микроорганизмы к среде. С этой целью за 24 часа до начала эксперимента накопительные культуры культивировали в среде для исследования процесса фосфатаккумуляции на перемешивающем устройстве ПЭ-6410 производства компании «Экрос» (Россия) со скоростью перемешивания 110 об/мин при температуре 24 ± 1 °С.

Далее для исследования процесса фосфатаккумуляции свежие питательные среды были инокулированы адаптированными накопительными культурами. Инокулят вносился в количестве 10 % от объема питательной среды; число колоний каждого изолята (см. п. 2.2.4) в питательной среде после инокуляции значительно варьировало.

Поскольку основным условием для индукции механизма фосфатаккумуляции является изменение концентрации растворенного кислорода

в среде, варьируя режим кислородного согласно принятой методике осуществлялось за счет прекращения / возобновления аэрации среды каждые 2 часа на протяжении 6 часов [99]. В каждой точке отбора проб проводились измерения концентрации растворенного кислорода, определение концентрации фосфат-ионов (см. п. 2.2.5).

В ходе исследования процесса фосфатаккумуляции аэрация осуществлялась с помощью компрессора. В случае использования перемешивающего устройства концентрация растворенного кислорода находилась на уровне не более 3 мг/дм³, система же с принудительной аэрацией (рис. 2.1) позволила увеличить концентрацию растворенного кислорода в питательной среде до 7 мг/дм³.

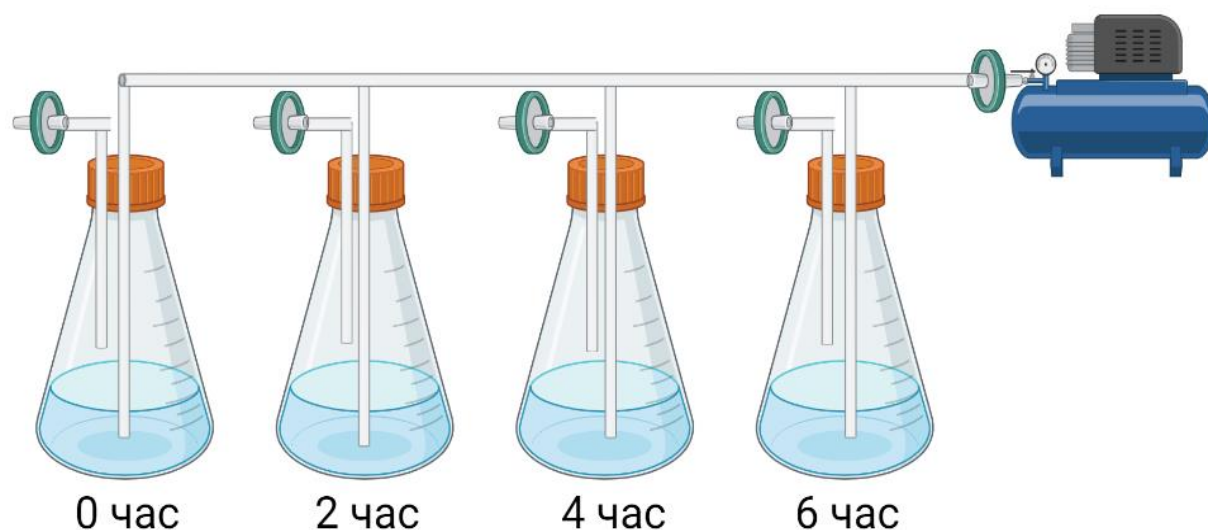


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки по определению фосфатаккумуляционной способности изолятов активного ила

Расчет эффективности удаления фосфат-ионов из модельной питательной среды был проведен по следующей формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{C_{\text{Н}}^{\text{PO}_4} - C_{\text{К}}^{\text{PO}_4}}{C_{\text{Н}}^{\text{PO}_4}} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

где $C_{\text{Н}}^{\text{PO}_4}$ – начальная концентрация фосфат-ионов, мг/дм³,

$C_{\text{К}}^{\text{PO}_4}$ – конечная концентрация фосфат-ионов, мг/дм³,

\mathcal{E} – эффективность удаления фосфат-ионов, %.

Для изолятов, имеющих способность к аккумуляции фосфат-ионов, была рассчитана удельная фосфатаккумуляционная способность (УФС) по формуле 2.2, которая представляет собой удельное количество фосфат-ионов, аккумулярованных единицей биомассы:

$$\text{УФС} = \frac{C_{\text{Н}}^{\text{PO}_4} - C_{\text{К}}^{\text{PO}_4}}{C_{\text{биомассы}}}, \quad (2.2)$$

где $C_{\text{биомассы}}$ – концентрация биомассы по методу Коха, КОЕ/мл;

УФС – удельная фосфатаккумуляционная способность, мг/дм³·КОЕ.

Данный показатель позволяет сравнивать фосфатаккумуляционную способность изолятов, несмотря на значительное различие в концентрации биомассы инокулятов (табл. 3.2).

Для изолятов, показавших фосфатаккумуляционную способность, была проведена идентификация методом секвенирования по Сэнгеру (п. 2.2.7), а также оценена степень накопления фосфора внутри клеток путем окрашивания их метиленовым синим по Леффлеру (п. 2.2.6.) и электронной микроскопии с элементным анализом (п. 2.2.8).

2.3.2 Изучение влияния внешних факторов среды на микробную фосфатаккумуляцию

Мониторинг работы узла биологической очистки осуществлялся на основании анализа экспериментальных исследований процесса, а также лабораторных данных очистных сооружений АО «ЗВКС» (г. Зеленодольск, Республика Татарстан) за 2020-2021 года.

Узел биологической очистки в схеме очистных сооружений АО «ЗВКС» включает в себя трехкоридорный аэротенк, в котором первый коридор служит регенератором активного ила, и вторичный отстойник с системой эрлифта для рециркуляции активного ила в регенератор (рис. 2.2).

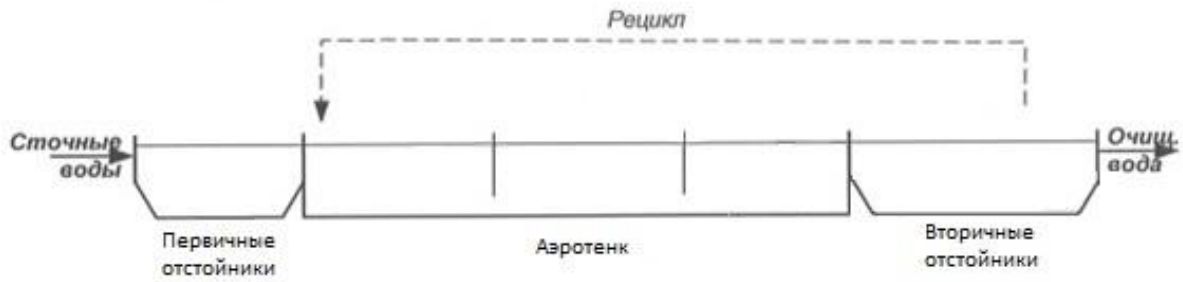


Рисунок 2.2 – Упрощенная схема очистных сооружений г. Зеленодольск

Отбор проб для оценки изменения концентрации фосфат-ионов в сточной воде в процессе ее биологической очистки осуществлялся согласно времени пребывания воды в каждом узле очистных сооружений. Продолжительность каждой стадии очистки была рассчитана на основании производственных и конструктивных данных и составила 1,5 ч для первичного отстойника, 9 ч для аэротенка-регенератора, 1,5 ч для вторичного отстойника.

Для детализации процесса биологической дефосфатации сточных вод количество точек отбора проб в процессе экспериментальных исследований было увеличено по сравнению с регламентом проведения лабораторных анализов на предприятии.

Мониторинг работы узла биологической очистки проводился на основании определения таких параметров поступающей и очищенной сточной воды (надиловой жидкости), как концентрации фосфат-ионов, органических веществ по ХПК, ионов аммония, нитрит- и нитрат-ионов, дозы ила по стандартным методикам, а также по значениям рН, температуры и концентрации растворенного кислорода (п. 2.2.6).

Обработка результатов производилась с использованием процедур статистического анализа пакета программ MS Office Excel.

2.3.3 Проведение опытно-промышленных испытаний по интенсификации биологической дефосфатации сточных вод

Объектом исследований на данном этапе работы выступали сточная вода и активный ил очистных сооружений БТИ-БОС с. Коцаково Пестречинского района Республики Татарстан.

Технологическое обеспечение данной модульной станции очистки сточных вод позволило создать чередование зон с разной степенью аэрации для стимуляции процесса микробной фосфатаккумуляции. Поскольку технологическая схема включает в себя 2 аналогичные линии очистки, одна из них (1 линия) выступала в качестве контрольной с организацией постоянной аэрации как в традиционной аэротенке, другая (2 линия) была опытной линией с реализацией условий последовательного чередования кислородных режимов (рис. 2.3).

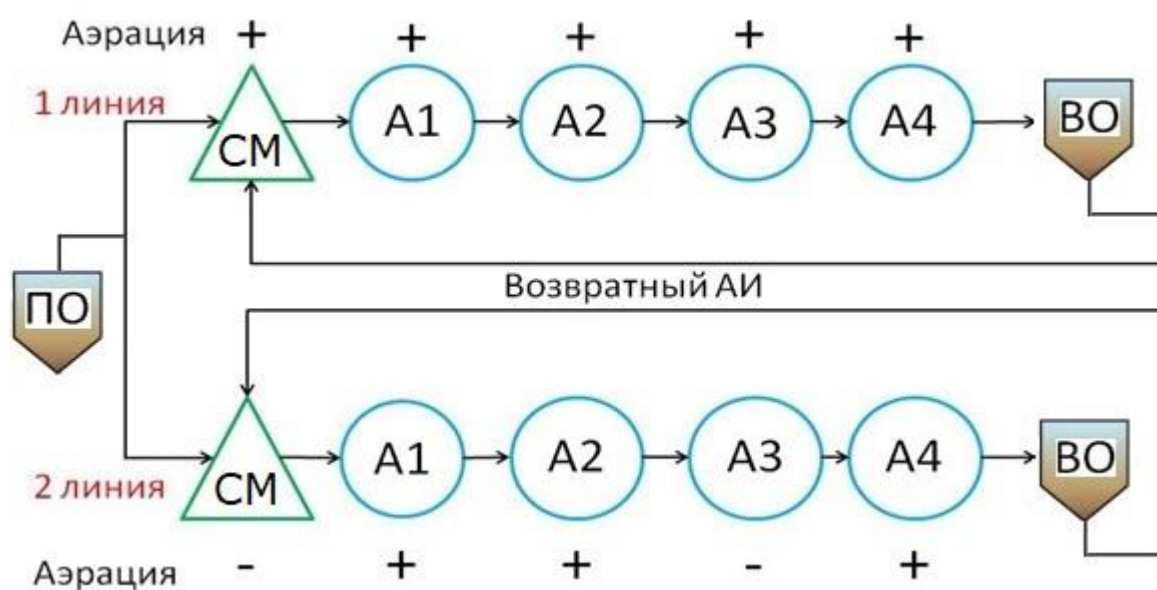


Рисунок 2.3 – Принципиальная технологическая схема узла биологической очистки БТИ-БОС с. Коцаково (ПО – первичный отстойник, СМ – смеситель с крупнопузырчатой аэрацией, А1-А4 – аэротенки, ВО – вторичный отстойник)

Технологическая схема узла биологической очистки с активным илом представлена денитрификатором, аэротенками и вторичным отстойником. Перемешивание иловой смеси в отдельных сооружениях узла биологической

очистки осуществлялось механически (-) или посредством принудительной аэрации (+), что позволило создать условия чередования режимов по содержанию растворенного кислорода.

Отбор проб для оценки изменения концентрации фосфат-ионов в сточной воде в процессе ее биологической очистки осуществлялся согласно времени пребывания воды в каждом узле очистных сооружений. Продолжительность каждой стадии очистки была рассчитана на основании производственных и конструктивных данных и составила 3 ч для смесителя с крупнопузырчатой аэрацией, 1,4 ч для каждого аэротенка (в сумме 6 ч), 1,5 ч для вторичного отстойника.

В процессе проведения опытно-промышленных испытаний определялись такие параметры водных проб как концентрация фосфат-ионов, органических веществ по ХПК и БПК₅, ионов аммония, нитрит-, нитрат-ионов, растворенного кислорода (п.2.2.6), а также индексы биоразнообразия ила (п. 2.2.9).

Обработка результатов производилась с использованием процедур статистического анализа пакета программ MS Office Excel.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Расчет потенциальной эффективности биологической дефосфатации в процессе микробной фосфатаккумуляции

Для оценки потенциально возможной степени удаления фосфат-ионов необходимо составить уравнения протекания микробной дефосфатации в условиях культивирования микроорганизмов без лимитирования процесса фосфатаккумуляции.

С этой целью процесс экспериментального моделирования был разделен на 3 стадии. Каждая стадия характеризуется определенным кислородным режимом:

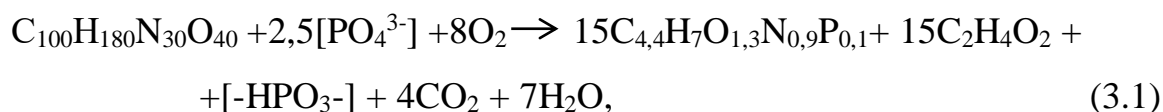
1. Включение принудительной аэрации;
2. Выключение принудительной аэрации;
3. Возобновление принудительной аэрации.

1 стадия – включение принудительной аэрации

Основным источником углерода для исследуемых изолятов в составе модельной питательной среды является пептон, источником фосфора – дигидрофосфат калия.

Поскольку выход энергии в процессе аэробного дыхания является значительным, в ходе первой стадии может наблюдаться прирост биомассы.

В соответствие с вышесказанным уравнение протекающего на первой стадии процесса может иметь следующий вид:



где $C_{100}H_{180}N_{30}O_{40}$ – усредненная химическая формула пептона,

$[PO_4^{3-}]$ – фосфат-ионы, вносимые в питательную среду,

$C_{4,4}H_7O_{1,3}N_{0,9}P_{0,1}$ – усредненная химическая формула биомассы,

$C_2H_4O_2$ – уксусная кислота,

$[-HPO_3^-]$ – звено внутриклеточной полифосфатной гранулы.

Коэффициент перед формулой биомассы в уравнении 3.1 был рассчитан по формуле (3.2):

$$Y = \frac{b \cdot M_6}{a \cdot M_{\text{орг}}}, \quad (3.2)$$

где Y – коэффициент прироста биомассы, который при моделировании процесса биологической очистки воды составляет в среднем 0,6 - 0,65 [55],

a, b – стехиометрические коэффициенты,

M_6 – молярный вес биомассы ($M(C_{4,4}H_7O_{1,3}N_{0,9}P_{0,1}) = 96,3$ г/моль),

$M_{\text{орг}}$ – молярный вес органического субстрата – пептона ($M(C_{100}H_{180}N_{30}O_{40}) = 2440$ г/моль).

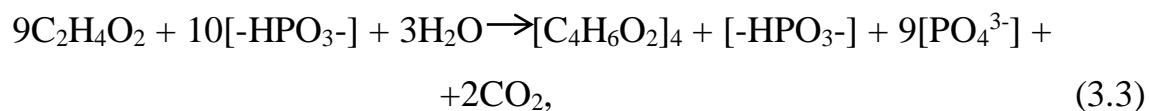
Примем $a = 1$, тогда значение коэффициента b можно вычислить следующим образом:

$$b = \frac{0,6 \cdot 1 \cdot 2440}{96,3} = 15.$$

Из уравнения 3.1 следует, что из 0,8 моль фосфора фосфатов (P-PO₄) лишь 0,4 моль фосфора войдет в состав полифосфатов (P-полиP), что составляет порядка 50%.

2 стадия – выключение принудительной аэрации

Уравнение протекающего на второй стадии процесса может иметь следующий вид:



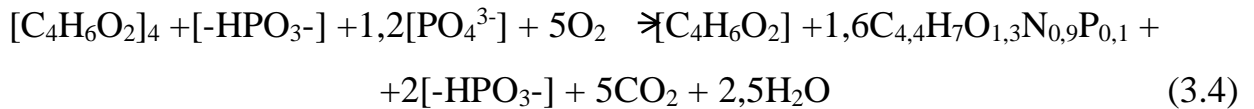
где $[C_4H_6O_2]_4$ – полимерные насыщенные оксикислоты (ПНО).

Поскольку в анаэробных условиях происходит образование полимерных насыщенных оксикислот, более сложных по составу по сравнению с субстратом, основное количество энергии клеток затрачивается на этот процесс. В связи с этим представляется возможным не учитывать прирост биомассы.

Из уравнения 3.3 следует, что из 3,9 моль фосфора полифосфатов (P-полиP) в питательную среду высвободится 2,9 моль фосфора фосфатов (P-PO₄), что составляет порядка 76%.

3 стадия – возобновление принудительной аэрации

Уравнение протекающего на третьей стадии процесса может иметь следующий вид:



Из уравнения 3.4 следует, что из 0,4 моль фосфора фосфатов (P-PO₄) 0,39 моль фосфора войдет в состав полифосфатов (P-полиP), что составляет порядка 97%.

В соответствие с вышеизложенным может быть рассчитана максимально возможная эффективность биологической дефосфатации при использовании пептона в качестве примера полноценной питательной среды и источника углерода.

Рассчитано, что теоретически в ходе процесса дефосфатации из среды может быть удалено 98 % фосфора-фосфатов; при этом 85 % от начальной концентрации фосфора фосфат-ионов может быть включено в состав внутриклеточных полифосфатных гранул [112].

3.2 Получение изолятов активного ила и изучение их фосфатаккумулялирующей способности

В биоценозе активного ила присутствует значительное количество фосфатаккумулялирующих микроорганизмов, к ним относятся такие рода как *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Accumulibacter* и т.д. [113]. Увеличение их доли в сообществе активного ила приведет к увеличению степени потребления фосфат-ионов из сточных вод, поскольку особенностью метаболизма данной группы бактерий является интенсивное запасание энергии в внутриклеточных полифосфатных гранулах, в то время как большинству представителей биоценоза ила фосфор необходим, в основном, в конструктивном обмене [14].

Выделение изолятов осуществляли из надильной жидкости, разбавленной в 10⁷ раз. Идентификация бактерий проводилась на основании культуральных и морфологических признаков.

В процессе инкубирования проб надиловой жидкости на питательной среде для выделения фосфатаккумуляирующих микроорганизмов было получено 9 бактериальных изолятов.

Таблица 3.1 – Культурально-морфологические характеристики изолятов, полученных из активного ила

Изолят	Морфологические свойства	Культуральные свойства
А	клетки мелкие кокковидные, Гр-, неподвижны, спорообразование отсутствует	колонии желто-белого цвета, средних размеров, круглой формы, гладкая блестящая поверхность
Р	клетки мелкие палочковидные, Гр-, неподвижны, спорообразование отсутствует	колонии молочного цвета, средних размеров, круглой формы, гладкая блестящая поверхность
В	клетки крупные палочковидные, Гр+, подвижны, отмечено спорообразование	колонии молочного цвета, крупные с неровными краями, матовая поверхность
С	клетки крупные палочковидные, Гр-, неподвижны, спорообразование отсутствует	колонии молочного цвета, крупных размеров, круглой формы, шероховатая матовая поверхность
К	клетки мелкие кокковидные, Гр+, неподвижны, спорообразование отсутствует	колонии белосого цвета, средних размеров, круглой формы, гладкая блестящая поверхность
Е	клетки средние палочковидные, Гр-, неподвижны, спорообразование отсутствует	колонии желто-белого цвета, средних размеров, овальной формы, гладкая блестящая поверхность
Н	клетки мелкие кокковидные, Гр-, подвижны, спорообразование отсутствует	колонии прозрачные, мелких размеров, круглой формы, блестящая поверхность
Z	клетки мелкие палочковидные, Гр-, неподвижны, спорообразование отсутствует	колонии молочного цвета, средних размеров, овальной формы, гладкая блестящая поверхность
М	клетки мелкие палочковидные, Гр-, подвижны, спорообразование отсутствует	колонии бело-голубого цвета, мелких размеров, круглой формы, гладкая блестящая поверхность

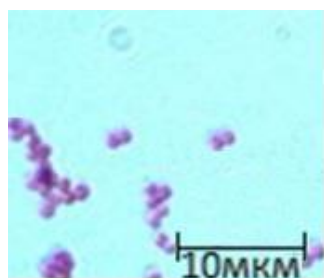
Далее каждый изолят был помещен в условия, моделирующие фосфатаккумуляцию, для определения способности к накоплению фосфат-ионов в виде внутриклеточных полифосфатных гранул, как это было описано в п. 2.2.3 (табл. 3.2).

Таблица 3.2 – Перечень изолятов, полученных из активного ила, с результатами проверки на наличие фосфатаккумулялирующей способности

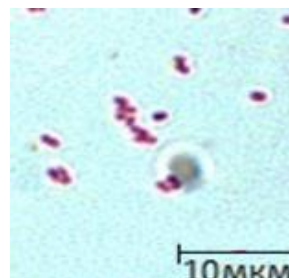
Изолят	Фосфатаккумулялирующая способность	Концентрация биомассы, КОЕ/см ³	Изолят	Фосфатаккумулялирующая способность	Концентрация биомассы, КОЕ/см ³
А	+	$5 \cdot 10^9$	Е	-	$6 \cdot 10^7$
Р	+	$4 \cdot 10^9$	Н	-	$1 \cdot 10^7$
В	-	$1 \cdot 10^{10}$	З	-	$9 \cdot 10^8$
С	-	$8 \cdot 10^8$	М	-	$4 \cdot 10^8$
К	-	$2 \cdot 10^9$			

По результатам моделирования процесса фосфатаккумуляции для дальнейших исследований были отобраны изоляты А и Р.

На рисунках 3.1 и 3.2 представлены внешний вид клеток и колоний накопительных культур изолятов А и Р.

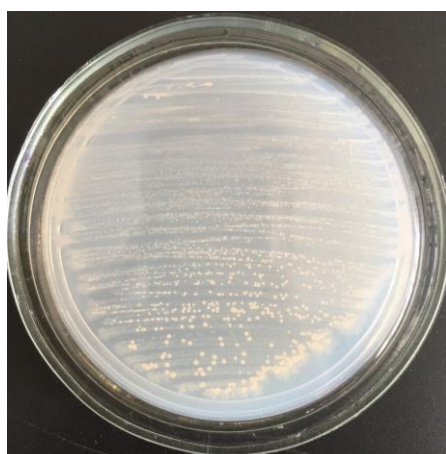


Изолят А

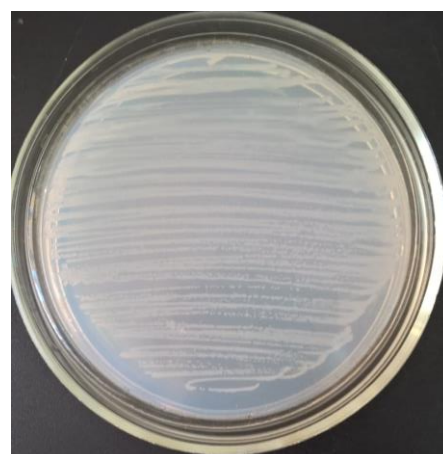


Изолят Р

Рисунок 3.1 – Бактерии изолятов А и Р, окрашенные по Граму



Изолят А



Изолят Р

Рисунок 3.2 – Колонии накопительных культур изолятов А и Р

Дальнейшие исследования изолятов А и Р включали в себя идентификацию и изучение их фосфатаккумулирующего потенциала.

3.2.1 Экспериментальная оценка фосфатаккумулирующей способности изолятов активного ила

Результаты, полученные при моделировании процесса фосфатаккумуляции с использованием изолятов А и Р, представлены на рисунках 3.3-3.6.

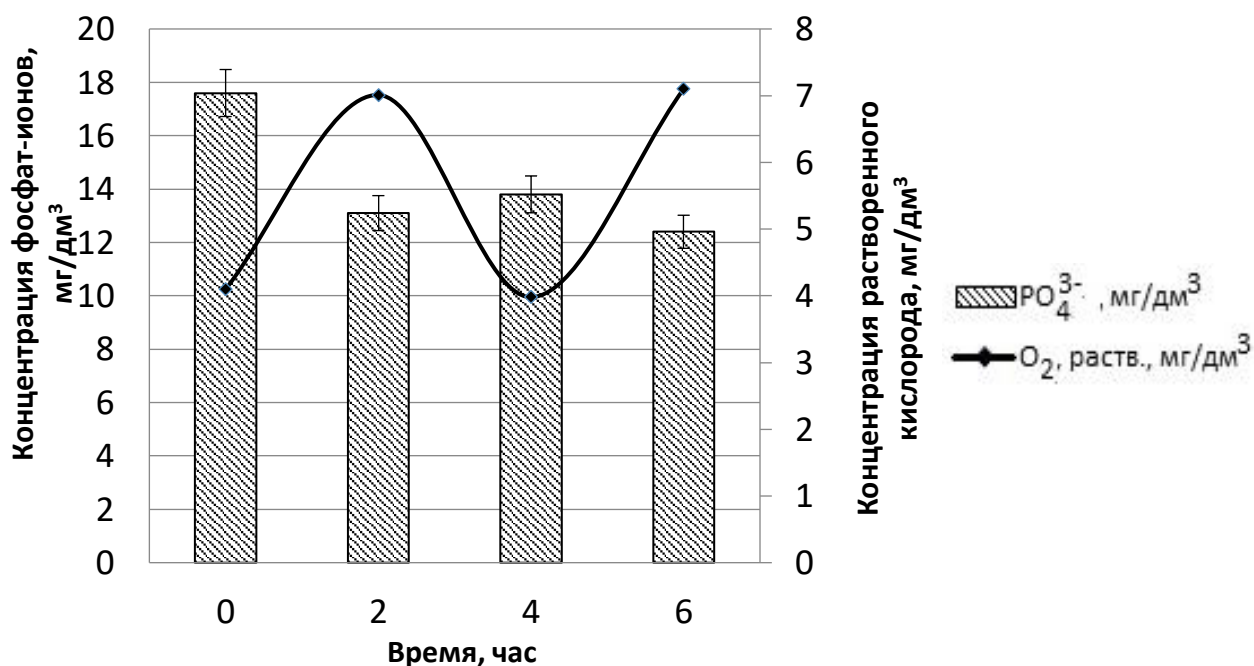


Рисунок 3.3 – Изменение концентраций фосфат-ионов и растворенного кислорода в процессе периодического культивирования бактерий в составе изолята А

Полученные в процессе экспериментальных исследований результаты соответствуют литературным данным о зависимости концентрации фосфат-ионов от концентрации растворенного кислорода в процессе биологической очистки сточных вод [34].

В условиях постоянной аэрации (рис. 3.3) наблюдается снижение концентрации фосфатов на 26 % от начального количества фосфатов (2-й час культивирования). Уменьшение количества растворенного кислорода в среде на

2,9 мг/дм³ привело к высвобождению фосфора фосфатов в количестве, равном 5 % от концентрации фосфора фосфатов на втором часу культивирования. Дальнейшее возобновление аэрации способствовало интенсивному потреблению фосфора фосфатов ФАО и снижению концентрации фосфора на 10,2 % по сравнению с показателями четвертого часа культивирования. Общая эффективность удаления фосфора фосфатов в процессе периодического культивирования изолята А в условиях изменения концентрации растворенного кислорода в пределах 4,2-7,1 мг/дм³ составила 30,2 % (рис. 3.3).

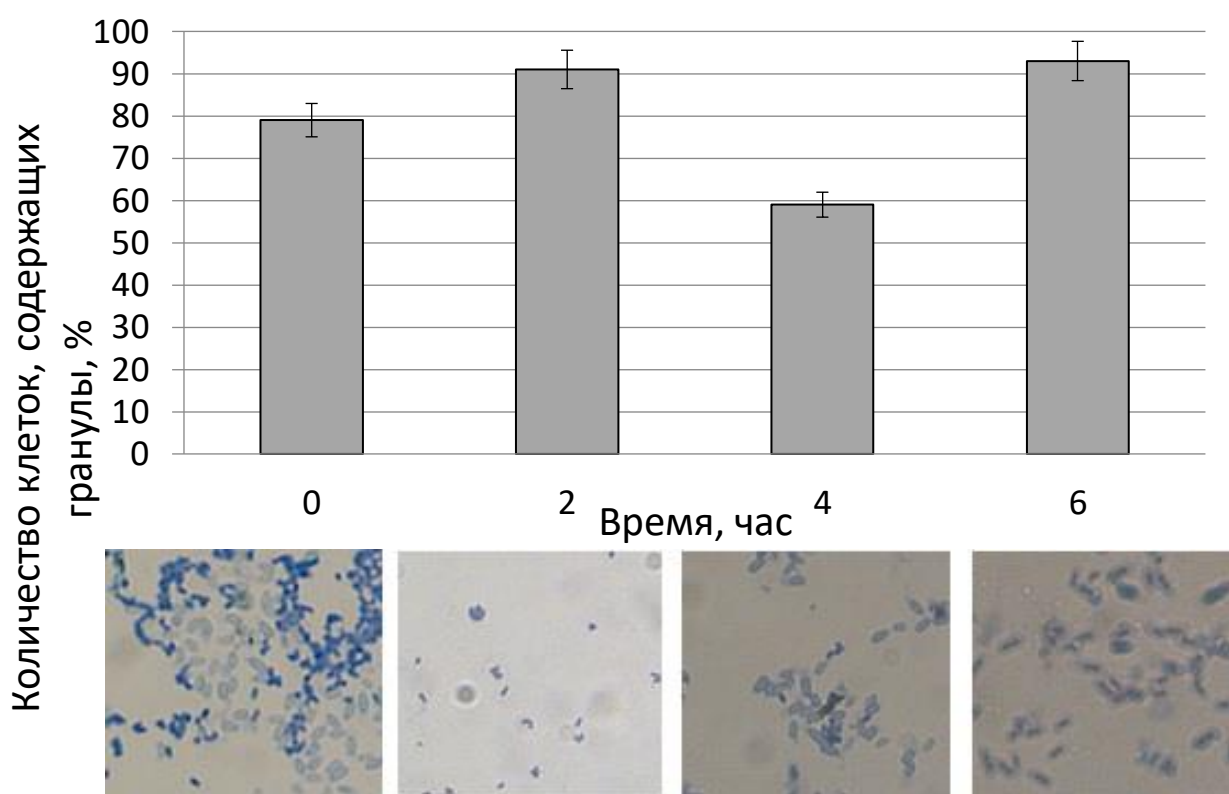


Рисунок 3.4 – Полифосфатные гранулы в клетках бактерий изолята А в процессе периодического культивирования (увеличения $\times 1000$) при изменении концентрации растворенного кислорода

Отмечено, что в условиях постоянной аэрации количество клеток бактерий изолята А, содержащих полифосфатные гранулы, увеличивается на 13,4 % (рис. 3.4), что связано с активным внутриклеточным запасанием фосфат-ионов в аэробных условиях.

Уменьшение количества растворенного кислорода в среде на $2,9 \text{ мг/дм}^3$ привело к уменьшению гранулосодержащих клеток на $52,8 \%$. При возобновлении аэрации число клеток, содержащих полифосфатные включения увеличилось на $55,0 \%$, что подтверждает экспериментальные данные, представленные на рисунке 3.3.

В условиях постоянной аэрации фосфат-ионы интенсивно потребляются ФАО изолята Р, что приводит к уменьшению их концентрации на $14,3 \%$ от начального количества фосфатов (2-й час культивирования) (рис. 3.5). Снижение количества растворенного кислорода на $3,7 \text{ мг/дм}^3$ привело к высвобождению фосфора фосфатов в количестве, равном $21,1 \%$ от концентрации фосфора фосфатов на втором часу культивирования. При дальнейшем возобновлении аэрации содержание фосфора фосфатов снижается на $13,1 \%$ по сравнению с показателями четвертого часа культивирования. Общая эффективность удаления фосфора фосфатов в процессе периодического культивирования изолята Р в условиях изменения концентрации растворенного кислорода в пределах $2,8\text{-}7,6 \text{ мг/дм}^3$ составила $9,8 \%$ (рис. 3.5).

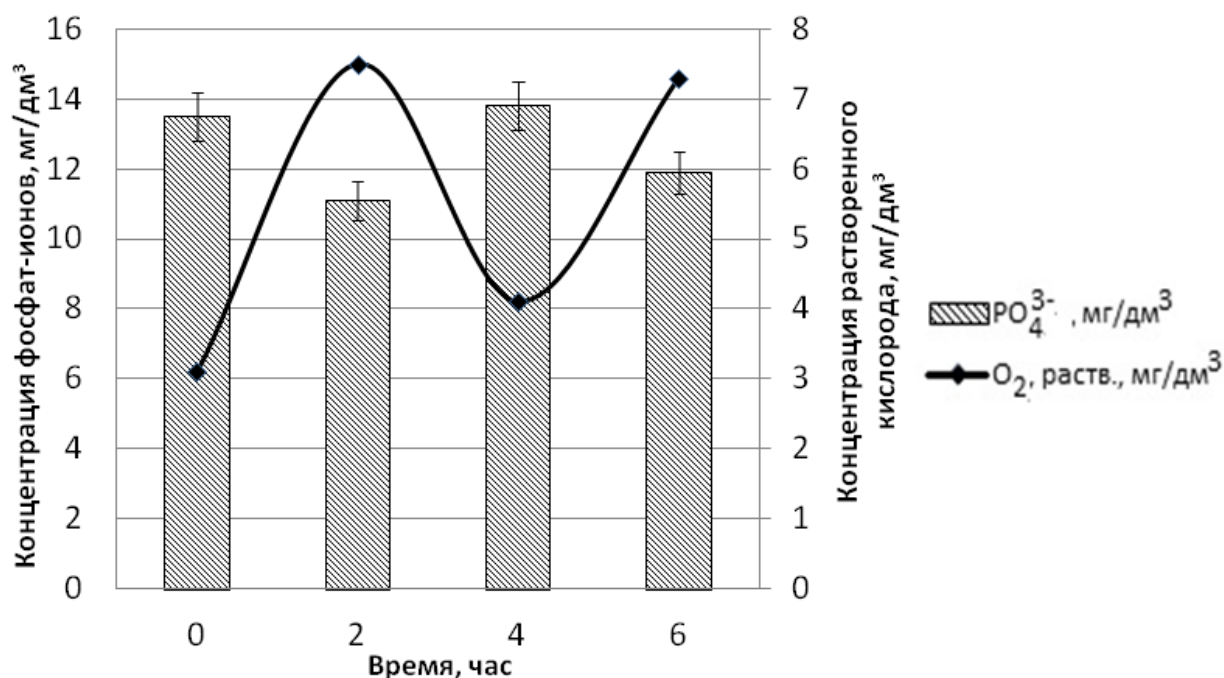


Рисунок 3.5 – Изменение концентраций фосфат-ионов и растворенного кислорода в процессе периодического культивирования бактерий в составе изолята Р

Показано, что в процессе аэробного периодического культивирования бактерий изолята Р количество клеток с полифосфатными включениями (рис. 3.6) увеличилось на 16,8 %. Снижение количества растворенного кислорода на 3,7 мг/дм³ способствовало выделению фосфат-ионов в культуральную жидкость и уменьшению числа гранулосодержащих клеток на 43,9 %. При возобновлении аэрации количество клеток, содержащих полифосфатные гранулы увеличилось на 44,4 %, что подтверждает результаты, представленные на рисунке 3.5.

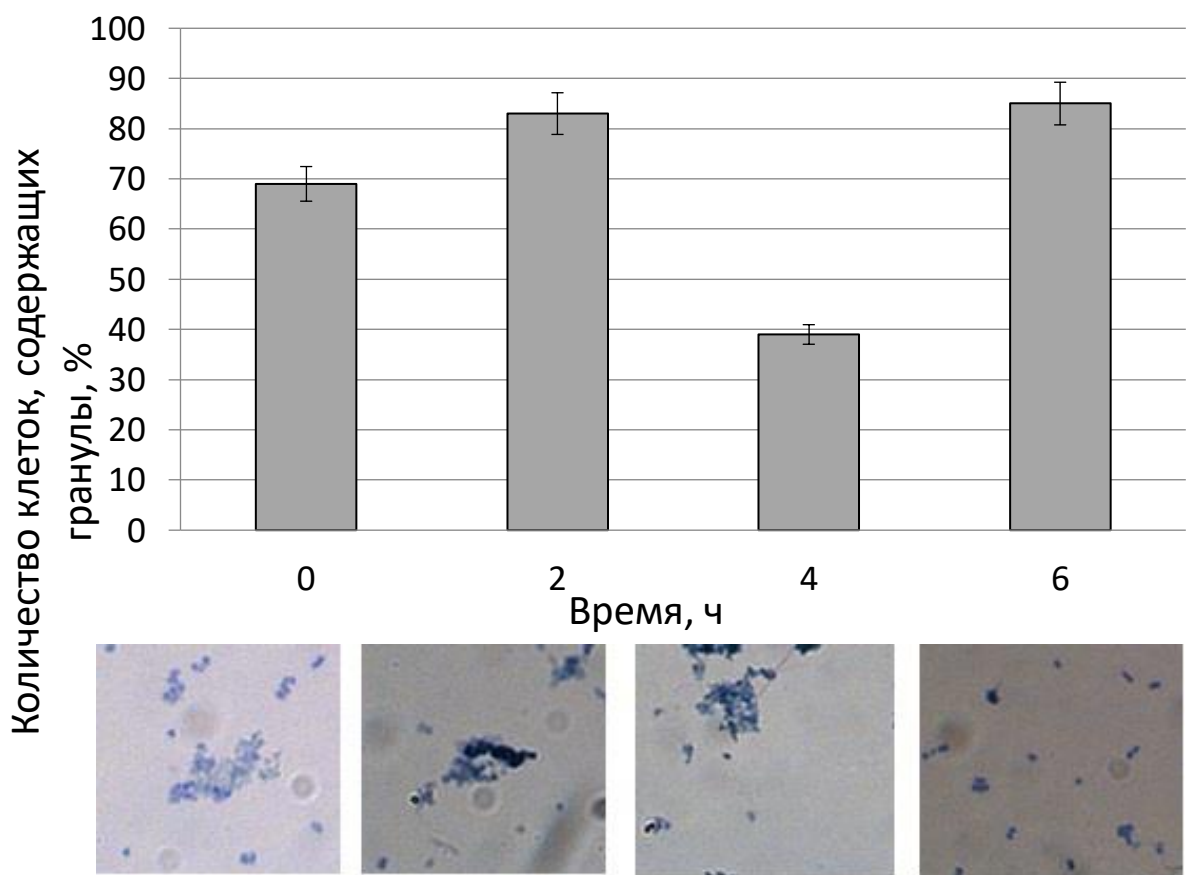


Рисунок 3.6 – Полифосфатные гранулы в клетках бактерий изолята Р в процессе периодического культивирования (увеличения $\times 1000$) при увеличении изменения концентрации растворенного кислорода

Для оценки потенциала изолятов в процессе биологического удаления фосфат-ионов был проведен расчет удельной фосфатаккумулирующей способности каждого рода, поскольку количество биомассы значительно

варьировалось (табл. 3.2). Значение удельной фосфатаккумулирующей способности изолятов А и Р составило $1,1 \cdot 10^{-10}$ и $0,3 \cdot 10^{-10}$ мг/дм³ · КОЕ, соответственно [114].

Несмотря на начальную высокую фосфатаккумулирующую способность, изолят А оказался нестабильным в процессе хранения и многократных пересевов в части сохранения фосфатаккумулирующих свойств, физиологической активности и жизнеспособности, в связи с чем дальнейшая работа проводилась с изолятом Р.

Результаты, полученные методом сканирующей электронной микроскопии с элементным анализом для изолята Р, приведены на рисунке 3.7 и в таблице 3.2.

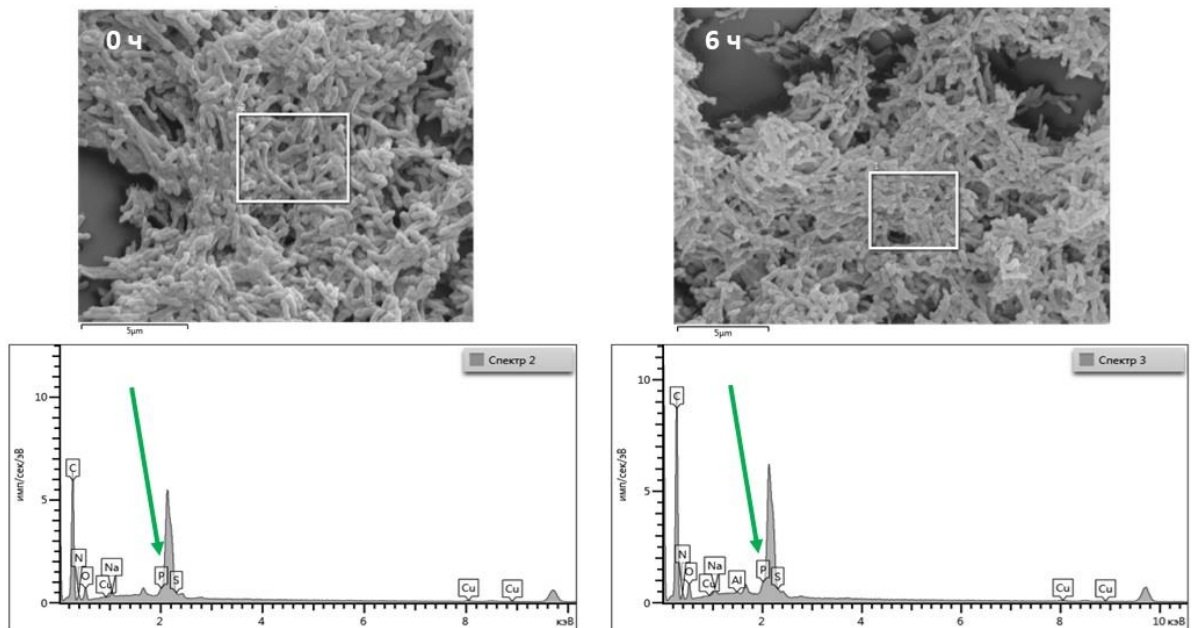


Рисунок 3.7 – Микрофотографии препаратов клеток изолята Р с элементным анализом в выделенных областях

На рисунке 3.7 показаны наиболее характерные для этих клеток спектры. Видно, что в процессе периодического культивирования происходит увеличение пика, соответствующего элементному фосфору, что свидетельствует о накоплении элемента фосфора в выделенных областях.

Таблица 3.2 – Содержание элементов углерода и фосфора в точках анализа, выраженное в процентах от общего содержания элементов

Элемент	С	Р	Р:С
Масс.% 0 час	62,430±6,870	0,320±0,035	0,005±0,001
Масс.% 6 час	83,000±9,130	0,670±0,074	0,008±0,001

Анализ полученных результатов (табл. 3.2.) показал, что содержание фосфора в клетках в конце периодического культивирования было больше, по сравнению с начальным моментом. Концентрация элемента фосфора в ходе чередования условий с аэрацией/без аэрации возросло, в среднем, на 37 %, что дает основание отнести бактерии выделенного изолята к группе фосфатаккумуляирующих микроорганизмов.

Таким образом, полученные результаты подтверждают фосфатаккумуляирующую способность бактерий в составе изолятов А и Р. Значение удельной фосфатаккумуляирующей способности бактерий изолятов А и Р составило $1,1 \cdot 10^{-10}$ и $0,3 \cdot 10^{-10}$ мг/дм³ ·КОЕ, соответственно, а точечный элементный анализ показал накопление элементного фосфора в клетках изолята. Фосфатаккумуляирующая способность выделенных из активного ила микробных культур обуславливает возможность использования данных бактерий для дальнейшего изучения и интенсификации процесса фосфатаккумуляции и дефосфатации сточных вод.

Эффективность удаления фосфат-ионов за счет микробной фосфатаккумуляции в ходе экспериментального исследования составляла от 10 до 30 %.

При этом следует отметить, что изучение процесса фосфатаккумуляции проводилось по стандартной экспериментальной методике, и процесс был ограничен по таким параметрам, как время и содержание растворенного кислорода в отличие от условий, принятых при построении уравнений дефосфатации, приведенных в п. 3.1 и описывающих данный процесс при

отсутствии лимитирующих факторов, а также с учетом потребления фосфатов для конструктивного обмена.

При изучении фосфатаккумулялирующей способности изолятов длительность каждой стадии составила 2 ч, что послужило ограничивающим фактором для насыщения или обеднения среды растворенным кислородом, а также прироста биомассы в ходе периодического культивирования.

3.2.2 Идентификация бактериальных изолятов

На основании секвенирования последовательности 16S рРНК бактерий в составе изолята Р была получена последовательность, состоящая из 1431 последовательности нуклеотидов (см. рис.3.8).

```
TGCCGCAGCCTACACATGCAGTCGAGCGGATGAGAGGAGCTTGCTCCTGGATTGAGCGGGGACGGGTGAGTAA
TGCCTAGGAATCTGCCTGGTAGTGGGGGACAACGTTTCGAAAGGAACGCTAATACCGCATACTGCTCCTACGGGAGA
AAGCAGGGGACCTTCGGGCCTTGCCTATCAGATGAGCCTAGGTCGGATTAGCTAGTTGGTGAGGTAATGGCTCA
CCAAGGCGACGATCCGTAACCTGGTCTGAGAGGATGATCAGTCACACTGGAACCTGAGACACGGTCCAGACTCCTAC
GGGAGGCAGCAGTGGGGAATATTGGACAATGGGCGAAAAGCCTGATCCAGCCATGCCGCGTGTGTGAAGAAGGT
CTTCGGATTGTAAGCACTTTAAGTTGGGAGGAAGGGTTGTAGATTAATACTCTGCAATTTTGACGTTACCGACAG
AATAAGCACCGGCTAACTCTGTGCCAGCAGCCGCGGTAATACAGAGGGTGAAGCGTTAATCGGAATTACTGGGC
GTAAAGCGCGCGTAGGTGGTTTGTAAAGTTGGATGTGAAATCCCCGGGCTCAACCTGGGAACTGCATCCAAAAC
GGCAAGCTAGAGTATGGTAGAGGGTGGTGGAAATTTCTGTGTAGCGGTGAAATGCGTAGATATAGGAAGGAACA
CCAGTGGCGAAGGCGACCACCTGGACTGATACTGACACTGAGGTGCGAAAAGCGTGGGGAGCAAACAGGATTAG
ATACCTGGTAGTCCACGCGTAAACGATGTCAACTAGCCGTTGGGAGCCTTGAGCTCTTAGTGGCGCAGCTAAC
GCATTAAGTTGACCGCTGGGGAGTACGGCCGCAAGGTTAAAACTCAAATGAATTGACGGGGCCCGCACAAAGC
GGTGGAGCATGTGGTTTAATTGCAAGCAACGCGAAGAACCTTACCAGGCCTTGACATCCAATGAACTTTCCAGAG
ATGGATTGGTGCCTTCGGGAACATTGAGACAGGTGCTGCATGGCTGTCGTCAGCTCGTGTGAGATGTTGGGT
TAAGTCCCGTAACGAGCGCAACCCTTGTCTTAGTTACCAGCACGTAATGGTGGGCCTCTAAGGAGACTGCCGGT
GACAAACCGGAGGAAGGTGGGGATGACGTCAGTCATATGACCCTTACGGCCTGGGCTACACACGTGCTACAA
TGGTCCGGTACACAGCGTTGCCAAGCCGCGAGGTGGAGCTAATCCATAAAACCGATCGTAGTCCGGATCGCAGTC
TGCAACTCGACTGCGTGAAGTCGGAATCGCTAGTAATCGCGAATCAGAATGTCGCGGTGAATACGTTCCCGGGCC
TTGTACACCCCGCCGTCACACCATGGGAGTGGGTTGCACCAGAAGTAGCTAGTCTAACCTTCGGGAGGACGGTA
CCACGGTGATTA
```

GenBank ▾

Pseudomonas atacamensis partial 16S rRNA gene, isolate Y58

GenBank: OA996519.1

[FASTA](#) [Graphics](#)

Go to:

LOCUS	OA996519	1414 bp	DNA	linear	BCT 11-APR-2022
DEFINITION	Pseudomonas atacamensis partial 16S rRNA gene, isolate Y58.				
ACCESSION	OA996519				
VERSION	OA996519.1				
DBLINK	BioProject: PRJEB44322				
KEYWORDS	.				
SOURCE	Pseudomonas atacamensis				
ORGANISM	Pseudomonas atacamensis Bacteria; Pseudomonadota; Gammaproteobacteria; Pseudomonadales; Pseudomonadaceae; Pseudomonas.				

Рисунок 3.8 – Последовательность олигонуклеотидов и результаты идентификации бактерий в составе изолята Р

Согласно нуклеотидной последовательности, приведенной на рисунке 3.8, установлено 99,82 % соответствие полученного изолята с *Pseudomonas atacamensis*, зарегистрированных в базе GenBank под номером Y 58 (рис. 3.8).

При изучении метаболизма бактерий *Pseudomonas atacamensis* и использованием базы данных KEGG (<https://www.genome.jp/kegg>) установлено сходство энергетического обмена с группой фосфатакмулирующих микроорганизмов (рис. 3.9).

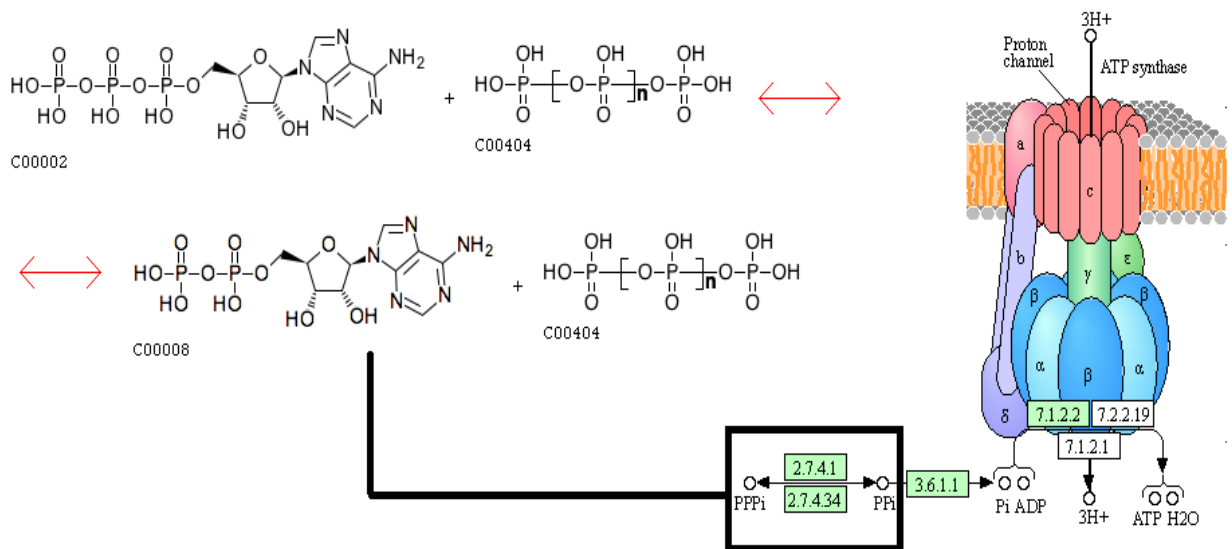


Рисунок 3.9 – Энергетический обмен бактерий *Pseudomonas atacamensis*

На основании данных, приведенных на рисунке 3.9, бактерии *Pseudomonas atacamensis* способны к накоплению энергии в виде полифосфатных гранул, которая в дальнейшем расходуется на потребление органического субстрата. Таким образом, изолят Р, преимущественно состоящий из бактерий *Pseudomonas atacamensis*, обладает способностью к фосфатаккумуляции.

3.2.3 Определение оптимального количества биомассы фосфатаккумулирующих организмов в инокуляте, обеспечивающего максимальную эффективность дефосфатации

В ходе экспериментальных исследований процессов дефосфатации модельной питательной среды была отмечена корреляция между количеством биомассы в инокулятах А, Р и эффективностью биологической дефосфатации. Эта зависимость имела экстремальный характер, что показано на рисунке 3.10.

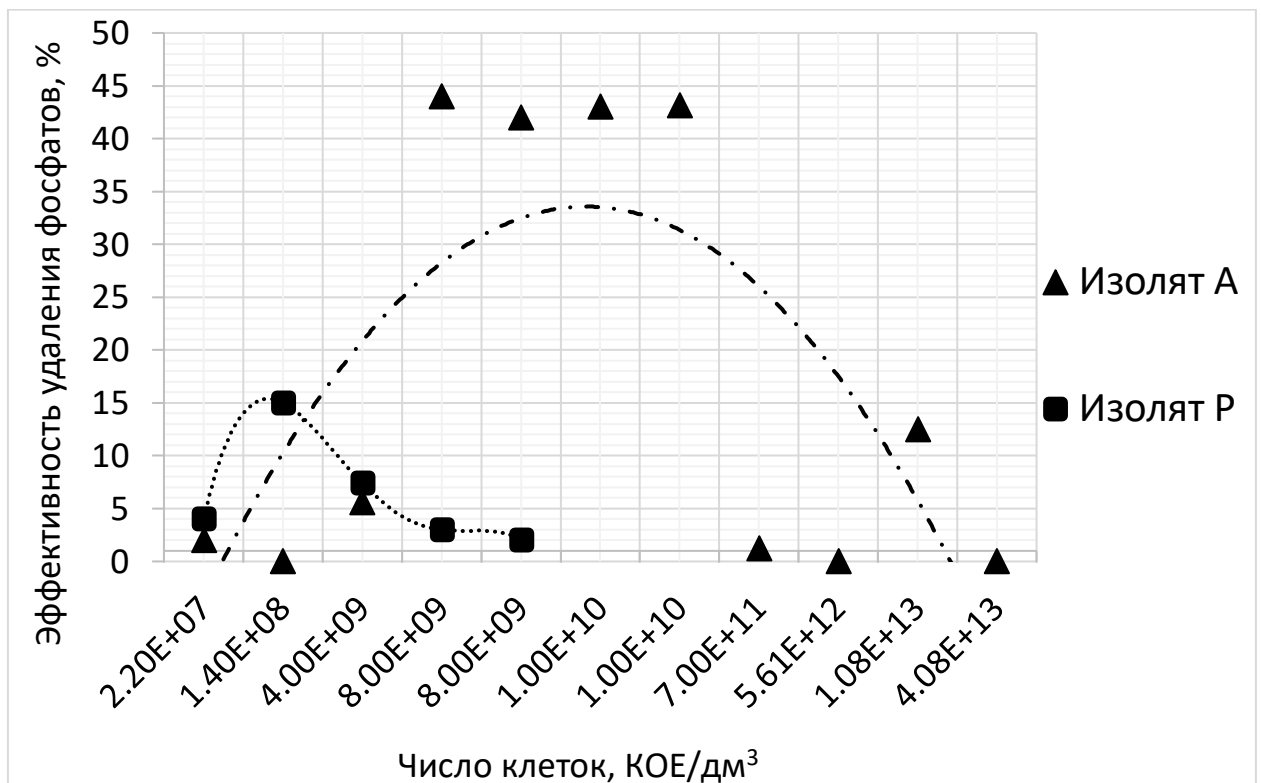


Рисунок 3.10 – Зависимость эффективности биологической дефосфатации от числа клеток в составе инокулята на основе изолятов А и Р

Согласно результатам, приведенным на рис. 3.10, максимальная степень удаления фосфат-ионов при моделировании процесса фосфатаккумуляции с использованием изолята А составила 40-45 %, при использовании изолята Р – 10-15 %.

Определено, что для числа клеток менее 3×10^7 КОЕ/см³ в составе инокулята процесс дефосфатации модельного раствора сточных вод с использованием

фосфатаккумуляирующих бактерий в составе изолятов А и Р не был отмечен. Оптимальная концентрация биомассы изолята А, позволяющая обеспечить максимальную фосфатаккумуляцию и эффективность дефосфатации модельного раствора, находится в диапазоне $8 \times 10^9 - 1 \times 10^{10}$ КОЕ/см³, а для изолята Р оптимальная концентрация лежит в пределах $6 \times 10^7 - 1 \times 10^9$ КОЕ/см³.

При этом значительное превышение оптимальной концентрации биомассы (более 4×10^{13} КОЕ/см³ для изолята А и более 1×10^{10} КОЕ/см³ для изолята Р) также снижает эффективность биологической дефосфатации, поскольку для запуска процесса фосфатаккумуляции необходим избыток углерода и фосфора [116].

Таким образом, для потенциальной эффективности суммарного удаления фосфат-ионов из модельной питательной среды в процессах фосфатаккумуляции и конструктивного обмена, составляющей 98%, теоретически рассчитанной выше (п. 3.1), вследствие фосфатаккумуляирующей способности выделенных из активного ила изолятов А и Р из питательной среды может быть изъято, в среднем, 30 % и 10 % фосфат-ионов, соответственно.

Для оптимальных значений концентрации биомассы степень удаления фосфатов за счет процесса микробной фосфатаккумуляции достигает максимальных значений: для изолята А с концентрацией клеток в инокуляте $8 \times 10^9 - 1 \times 10^{10}$ КОЕ/см³ она составляет 45 %; в случае изолята Р – 15 % при концентрации клеток в инокуляте $6 \times 10^7 - 1 \times 10^9$ КОЕ/см³.

3.3 Изучение влияния внешних факторов среды на микробную фосфатаккумуляцию

3.3.1 Мониторинг работы узла биологической очистки

городских очистных сооружений

В ходе оценки работы станции биологической очистки сточных вод в период с 11 октября 2021 года по 22 октября 2021 года были получены результаты, усредненные значения которых приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Показатели сточной воды в процессе очистки на станции биологической очистки при дозе ила 2,5 мг/дм³

Место отбора пробы Показатель	Сточная вода	Первичный отстойник	Место смешения сточной воды и активного ила	Начало аэротенка	Середина аэротенка	Конец аэротенка	Вторичный отстойник
Температура, °С	20,8	20,3	20,0	20,0	20,1	19,9	20,0
рН, ед	7,6	7,2	7,4	7,1	7,1	7,5	7,5
Концентрация растворенного кислорода, мг/дм ³	0,51	1,73	3,30	4,20	4,17	4,30	2,40
Концентрация фосфат-ионов, мг/дм ³	16,8±1,0	17,1±1,0	11,3±0,7	10,3±0,6	2,3±0,1	0,40±0,03	0,20±0,01
Концентрация органических веществ, мг/дм ³	202,7±48,6	221,1±53,1	165,8±39,8	133,6±32,1	124,4±29,9	119,7±28,7	87,5±21,0
Концентрация ионов аммония, мг/дм ³	72,0±15,1	62,5±13,1	28,5±5,9	27,3±5,7	17,9±3,8	12,6±2,7	12,5±2,6
Концентрация нитрит-ионов, мг/дм ³	0,9±0,1	0,8±0,1	0,6±0,1	0,20±0,02	0,5±0,1	0,7±0,1	1,4±0,2
Концентрация нитрат-ионов, мг/дм ³	0,10±0,01	0,50±0,03	8,3±0,6	5,3±0,4	6,4±0,5	16,7±1,2	18,4±1,3

Согласно результатам мониторинга работы биологического узла очистных сооружений эффективность дефосфатации сточных вод составляет около 99 %,

удаления органических веществ по ХПК 57 %, ионов аммония – 83 %, что свидетельствует о периоде эксплуатации очистных сооружений, характеризующемся неглубоким удалением органических веществ (Приложение А).

Кроме того, результаты анализа содержания нитрит- и нитрат-ионов указывают на неполное протекание процесса нитрификации, что может быть связано с недостаточным временем контакта сточной воды и активного ила, поскольку один коридор аэротенка выполняет функцию регенератора. Следует обратить внимание на пониженное содержание нитрат-ионов, что может быть связано с протеканием процесса денитрификации с участием гетеротрофных бактерий, к примеру, *P.denitrificans* [117].

Концентрация растворенного кислорода во всех зонах аэротенка (начало, середина, конец) по схеме очистки с постоянной аэрацией практически не изменяется, что препятствует активизации деятельности фосфатаккумулирующих бактерий в составе активного ила, поскольку для индукции процесса аккумулярования необходимы условия чередования кислородных зон [14]. В связи с этим удаление фосфат-ионов происходит постепенно и неполностью на протяжении контакта сточной воды с активным илом в течение всего периода аэрации.

Высокая эффективность удаления фосфат-ионов по традиционной схеме очистки обеспечивается применением реагентного препарата на основе оксихлорида алюминия, который дозируется в сточную воду после первичных отстойников.

3.3.2 Оценка зависимости эффективности дефосфатации от факторов среды

В качестве рассматриваемых параметров, влияющих на эффективность дефосфатации, были определены концентрации фосфат-ионов, органических веществ, коэффициент нитрификации (включает отношение ионов аммония,

нитрит- и нитрат-ионов), температура, рН, концентрация растворенного кислорода, доза ила [2].

Согласно анализу лабораторных производственных данных очистных сооружений средняя эффективность удаления фосфат-ионов в течение 2020-2021 годов составляет 79 %.

При этом выявлено изменение средней эффективности удаления фосфат-ионов из сточных вод в период смены времен года (рис. 3.11).

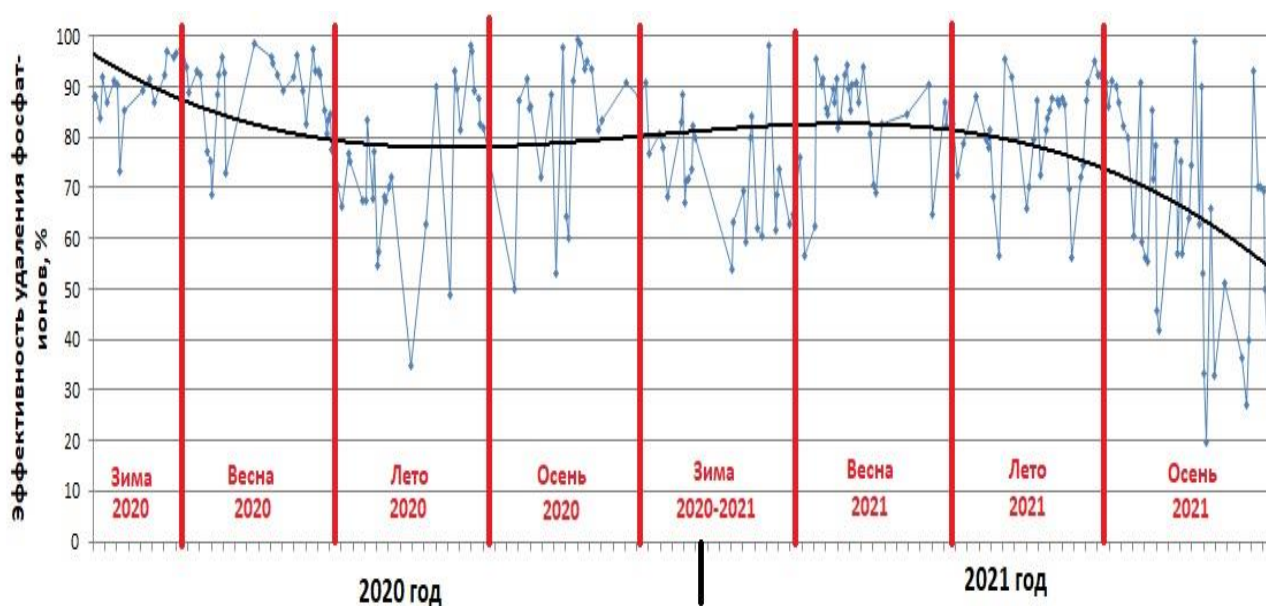


Рисунок 3.11 – Изменение эффективности удаления фосфат-ионов из сточных вод в течение 2020-2021 годов

Представленные данные (рис. 3.11) свидетельствуют о незначительном уменьшении эффективности удаления фосфат-ионов в летне-осенний период (в среднем на 9 %) и увеличении в зимне-весенний период (в среднем на 10 %).

Выявленная закономерность может быть связана с зависимостью растворимости кислорода от температуры жидкой среды и, как следствие, с изменением скорости потребления фосфат-ионов из сточной воды при одинаковых прочих факторах [106]. Согласно литературным данным повышение концентрации растворенного кислорода способствует увеличению скорости потребления фосфатов фосфатаккумуляирующими микроорганизмами [2].

Поскольку особый интерес представляет процесс микробной аккумуляции фосфора, была проведена выборка значений из производственных данных, параметры которых удовлетворяют условиям протекания микробной фосфатаккумуляции (табл. 3.4).

Для подтверждения гипотезы о влиянии вышеперечисленных параметров культивирования микробного сообщества активного ила на фосфатаккумуляционную способность бактерий в его составе были рассчитаны коэффициенты корреляции для каждого из рассмотренных параметров [118]. Количество анализируемых параметров равно 6, следовательно, минимальное количество точек N определяется по формуле 3.5 [119]:

$$N=2^n, \quad (3.5)$$

где n – количество параметров.

Таким образом, минимальное количество точек для статистически корректного результата равно 64.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Коэффициенты корреляции параметров, влияющих на микробную фосфатаккумуляцию

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение	Коэффициент корреляции	t-критерий Стьюдента
Температура, °С	11	26	-0,027	0,33
Активная реакция среды, рН	7	7,7	-0,106	1,59
Концентрация растворенного кислорода, мг/дм ³	2,03	4,0	-0,268	5,71
Доза ила, мг/дм ³	1,5	4,0	-0,127	1,47
Концентрация органических веществ по БПК ₅ , мг/дм ³	152	985	0,112	2,24
Коэффициент нитрификации (K_N)	0,004	0,518	0,084	1,9

Согласно результатам, приведенным в таблице 3.4, наибольшее численное значение коэффициента корреляции (по модулю) соответствует концентрации растворенного кислорода, что говорит о большой степени влияния данного параметра для эффективности дефосфатации.

Для определения значимости параметров был рассчитан t-критерий Стьюдента, который сравнивается с табличным значением (1,97) [119]. Значение расчетного t-критерия больше табличного для концентрации растворенного кислорода и органических веществ, что позволяет принимать их во внимание при анализе фосфатаккумуляции в ходе мониторинга производственного процесса биологической очистки сточных вод [120].

Однако, низкие числовые значения коэффициентов корреляции каждого параметра по отдельности, обуславливают необходимость детальной обработки лабораторных данных с определением коэффициентов регрессии для каждого фактора.

Исходное уравнение регрессии, описывающее процесс дефосфатации в пределах 77-89%, имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{Э} = & 86,857 - 1,066 \cdot [\text{O}_2] + 0,822 \cdot [\text{ДИ}] - 0,398 \cdot [\text{БПК}_5] + \\ & + 0,229 \cdot \text{K}_\text{N} + 0,001t + 0,003\text{pH} \end{aligned} \quad (3.5)$$

где Э – эффективность биологической дефосфатации, %;

$[\text{O}_2]$ – концентрация растворенного кислорода, мг/дм³;

$[\text{ДИ}]$ – доза ила, г/дм³;

$[\text{БПК}_5]$ – концентрация органических веществ, мг/дм³;

K_N – коэффициент нитрификации;

t – температура сточных вод, °С;

pH – активная реакция среды, усл.ед..

С целью оценки значимости факторов на начальном этапе был произведен расчет коэффициентов Стьюдента для факторов, принятых для оценки влияния на процесс микробной фосфатаккумуляции (табл. 3.5).

Таблица 3.5 – Коэффициенты регрессии параметров, влияющих на микробную фосфатаккумуляцию

Параметр	Коэффициент регрессии	t-критерий Стьюдента		Значимость фактора
		расчетный	табличный	
Концентрация растворенного кислорода, мг/дм ³	-1,066	0,04	1,97	значим
Доза ила, г/дм ³	0,822			значим
Концентрация органических веществ по БПК ₅ , мг/дм ³	-0,398			значим
Коэффициент нитрификации (K _N)	0,229			значим
Температура, °С	0,001			незначим
pH	0,003			незначим

На основании результатов, приведенных в таблице 3.5, из регрессионного уравнения были исключены незначимые параметры, а именно температура и pH среды, поскольку значения критерия Стьюдента для них по модулю оказались меньшими, чем расчетное значение этого критерия.

В дальнейшем использовалась регрессионное уравнение, в котором были учтены следующие факторы:

- концентрация растворенного кислорода;
- доза ила;
- концентрация органических веществ по БПК₅;
- коэффициент нитрификации.

Данное уравнение составлено по результатам мониторинга станции биологической очистки с учетом эффективности процесса дефосфатации в пределах 77-89 % и имеет вид:

$$\Xi = 86,857 - 1,066 \cdot [O_2] + 0,822 \cdot [ДИ] - 0,398 \cdot [БПК_5] + 0,229 \cdot K_N, \quad (3.5)$$

Данное уравнение справедливо для изменения параметров в следующих диапазонах:

- концентрация растворенного кислорода от 2 до 4 мг/дм³;
- доза ила от 1,7 до 2,9 г/дм³;
- концентрация органических веществ по БПК₅ от 172 до 411 мг/дм³;

- коэффициент нитрификации от 0,009 до 0,325.

Полученное уравнение было проверено по статистическим критериям для установления возможности его применения к описанию процесса биологической дефосфатации сточных вод.

К таким критериям относятся критерии Фишера, отражающего адекватность регрессионной модели, и Кохрена, показывающего однородность дисперсий, оценку средней ошибки, которая отражает степень отклонения экспериментальных данных от полученных путем расчета на основании регрессионной модели [121]. Результаты проверки по статистическим параметрам приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Проверка адекватности модели по критерию Фишера, Кохрена и стандартной ошибке

Критерий				
Фишера		Кохрена		Стандартная ошибка
расчетный	табличный	расчетный	табличный	
0,20	5,32	0,29	0,68	2,5 %
расч.<табл. модель адекватна		расч.<табл. дисперсии однородны		<5 % модель адекватна

На основании результатов, приведенных в таблице 3.6, полученное регрессионное уравнение адекватно и достоверно.

Значения коэффициентов регрессии (уравнение 3.5) позволяют определить степень и характер зависимости эффективности дефосфатации от каждого фактора с учетом многофакторности процесса.

Так, коэффициент регрессии перед концентрацией растворенного кислорода указывает на обратно пропорциональную зависимость с значительной степенью влияния. Это может быть связано с тем, что основная доля фосфат-ионов потребляется группой фосфатаккумулирующих бактерий в силу особенностей их

метаболизма, а запуск процесса аккумуляции фосфатов происходит только при нахождении биомассы в условиях пониженного содержания кислорода, после которой при попадании в аэробную зону следует интенсивное потребление фосфат-ионов [122].

На основании расчета коэффициентов зависимостей в качестве фактора с наибольшей степенью влияния на процесс биологической дефосфатации была выбрана концентрация растворенного кислорода. Таким образом, основным подходом к модернизации модульных очистных сооружений в ходе дальнейших опытно-промышленных испытаний стало чередование условий с пониженным и повышенным уровнем растворенного кислорода вследствие последовательного отключения и включения аэрации и, таким образом, реализации принципа зонной аэрации.

3.4 Интенсификация процесса

биологической дефосфатации сточных вод

Мониторинг работы очистных сооружений БТИ-БОС с. Кошаково показал, что средняя эффективность удаления органических веществ по ХПК составляет 50 %, ионов аммония – 12 %, фосфат-ионов – 44 % при усредненном составе сточных вод, состав которых приведен в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Усредненный состав сточных вод БТИ-БОС с. Кошаково

Показатель	Значение
рН, ед.рН	7,4 ± 0,2
ХПК, мг O ₂ /дм ³	1042 ± 156
БПК ₅ , мгO ₂ /дм ³	420 ± 50
Фосфат-ионы, мг/дм ³	29,1 ± 3,5
Ионы аммония, мг/дм ³	71 ± 14
Нитрит-ионы, мг/дм ³	< 0,02
Нитрат-ионы, мг/дм ³	2,0 ± 0,6

В дальнейшем на базе очистных сооружений БТИ-БОС с. Кошаково проводились опытно-промышленные испытания технического предложения, основанного на принципе зонной аэрации в процессе аэробной биоочистки сточных вод, сформулированного по результатам проведенных ранее лабораторных экспериментальных исследований с образцами активного ила из очистных сооружений АО «Чистополь-Водоканал» и АО «Зеленодольск-Водоканалсервис».

Обоснованность проверки полученных ранее результатов в рамках проведения опытно-промышленных испытаний на очистных сооружениях БТИ-БОС с. Кошаково являлось то, что основную долю поступающих сточных вод составляют коммунально-бытовые сточные воды; таким образом, их состав по

источникам основных питательных субстратов (углерода, азота, фосфора) был аналогичным сточным водам сооружений, исследованных ранее. Кроме того, очистные сооружения БТИ-БОС с. Кошаково комплектуются двумя идентичными параллельно работающими технологическими линиями, одна из которых выступала в качестве опытной, а другая – контрольной.

Активный ил данной очистной станции был охарактеризован как стабильно работающий на основании индексов биоразнообразия (табл. 3.8). Однако, отмечено наличие залповых сбросов сточной воды, поскольку доминирующими в изучаемом активном иле являются нитчатые бактерии [123].

Таблица 3.8 – Значения индексов биоразнообразия активного ила БТИ-БОС с. Кошаково

Показатель	1 линия	2 линия
Индекс Шеннона (биоразнообразие)	3,51 (значительное)	3,17 (значительное)
Индекс Куба (распределение по родам)	26,51 (равномерное)	23,59 (равномерное)
Индекс Маргалефа (родовое богатство)	3,99 (значительное)	3,57 (значительное)
Доминирующие виды	Нитчатые микроорганизмы, <i>Vorticella microstoma</i> , <i>Arcella discoides</i>	Нитчатые микроорганизмы, <i>Vorticella microstoma</i> , <i>Arcella discoides</i>

В работе экспериментально исследована дефосфатирующая способность активного ила в условиях постоянной и зонной (с чередованием кислородных режимов) аэрации (рис. 3.12, 3.13).

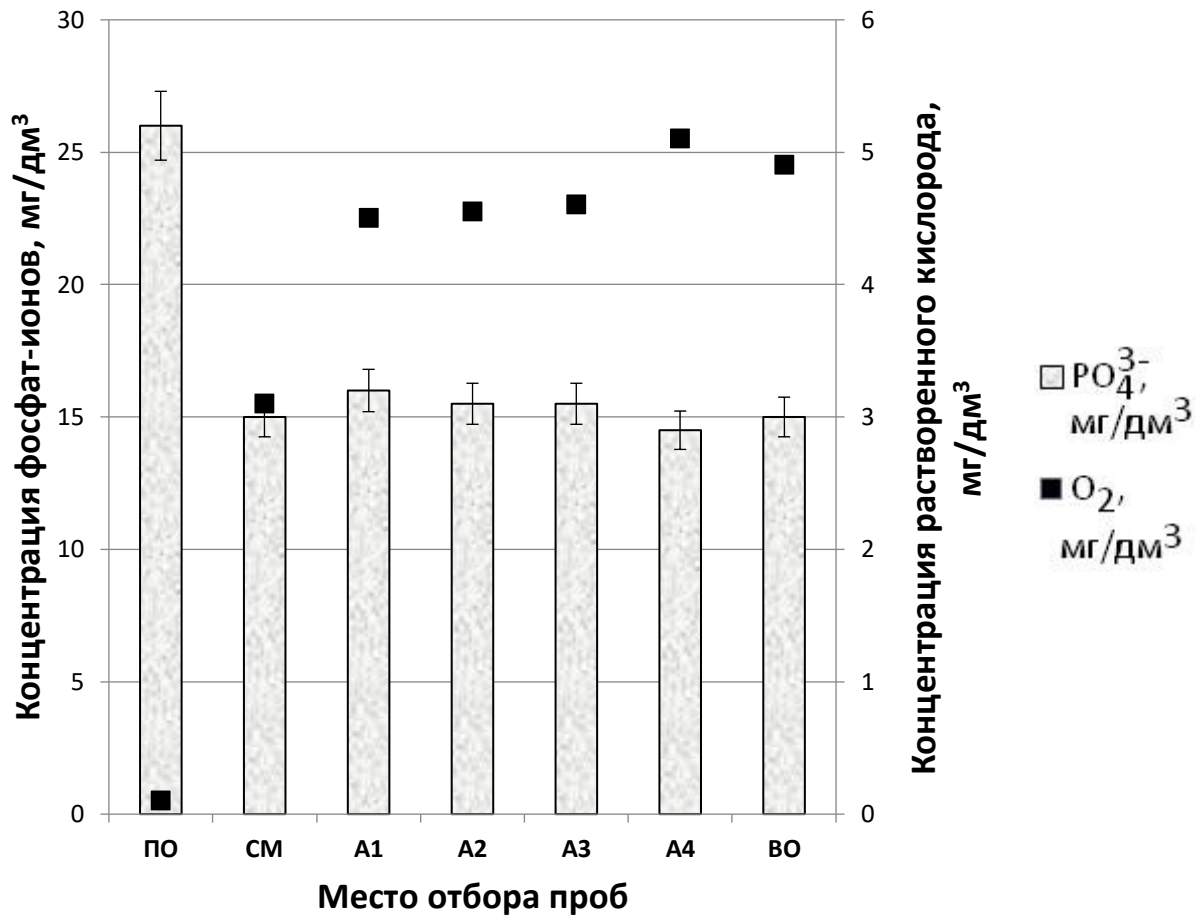


Рисунок 3.12 – Изменение концентрации фосфат-ионов в условиях постоянной аэрации (ПО – первичный отстойник, СМ – смеситель с крупнопузырчатой аэрацией, А1-А4 – четыре аэротенка, ВО – вторичный отстойник)

Результаты, представленные на рисунке 3.12, свидетельствуют о том, что в условиях постоянной аэрации и концентрации кислорода на уровне 3-5 mg/dm^3 происходит потребление фосфат-ионов и снижение их концентрации до 14 mg/dm^3 . Максимальная эффективность биологической дефосфатации в условиях постоянной аэрации за период наблюдения составила 48 % [124].

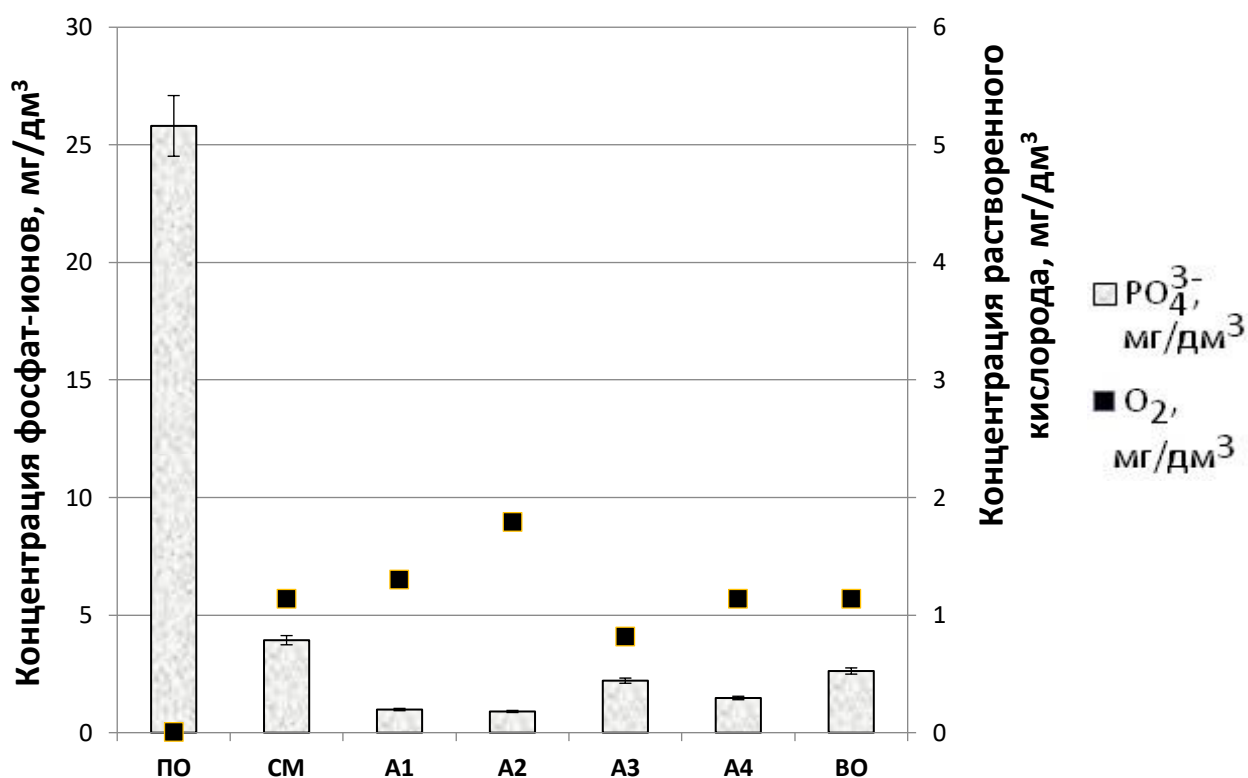


Рисунок 3.13 – Изменение концентрации фосфат-ионов в условиях чередования кислородных режимов (ПО – первичный отстойник, СМ – смеситель с крупнопузырчатой аэрацией, А1-А4 – четыре аэротенка, ВО – вторичный отстойник)

Данные, приведенные на рисунке 3.13, свидетельствуют о том, что при концентрации кислорода 1,1-1,8 мг/дм³ в смесителе и в первых двух аэротенках при поступлении сточной воды из первичного отстойника концентрация фосфат-ионов снижается на 96 %.

Это может объясняться нахождением активного ила во вторичном отстойнике в условиях пониженного содержания кислорода, а затем его дальнейшей рециркуляции в зону аэрации – в смеситель с крупнопузырчатой аэрацией, где при контакте возвратного ила со сточной водой происходит интенсивное потребление фосфат-ионов. Значительная разница удаления фосфат-ионов в смесителе с крупнопузырчатой аэрацией в условиях постоянной и зонной аэрации обусловлена высокой активностью группы фосфатаккумулирующих

микроорганизмов в результате длительного пребывания активного ила в условиях чередования кислородных режимов [123].

Дальнейшее снижение концентрации кислорода до $0,8 \text{ мг/дм}^3$ приводит к высвобождению $1,3 \text{ мг/дм}^3$ фосфат-ионов в надилловую жидкость. При последующем увеличении содержания кислорода в среде до $1,1 \text{ мг/дм}^3$ происходит интенсивное потребление фосфат-ионов и снижение их концентрации до $2,6 \text{ мг/дм}^3$, что является отличительной особенностью метаболизма группы фосфатаккумуляирующих микроорганизмов [123]. Максимальная эффективность биологической очистки в условиях чередования кислородных режимов за период наблюдения составила 89 % (Приложение Б) [125].

Помимо удаления фосфат-ионов из сточных вод процесс очистки сточной воды в условиях постоянной и зонной аэрации был проанализирован по всем основным показателям: количество органических веществ по ХПК, ионов аммония, нитрит-, нитрат-ионов. Результаты мониторинга состава сточных вод приведены на рисунке 3.14.

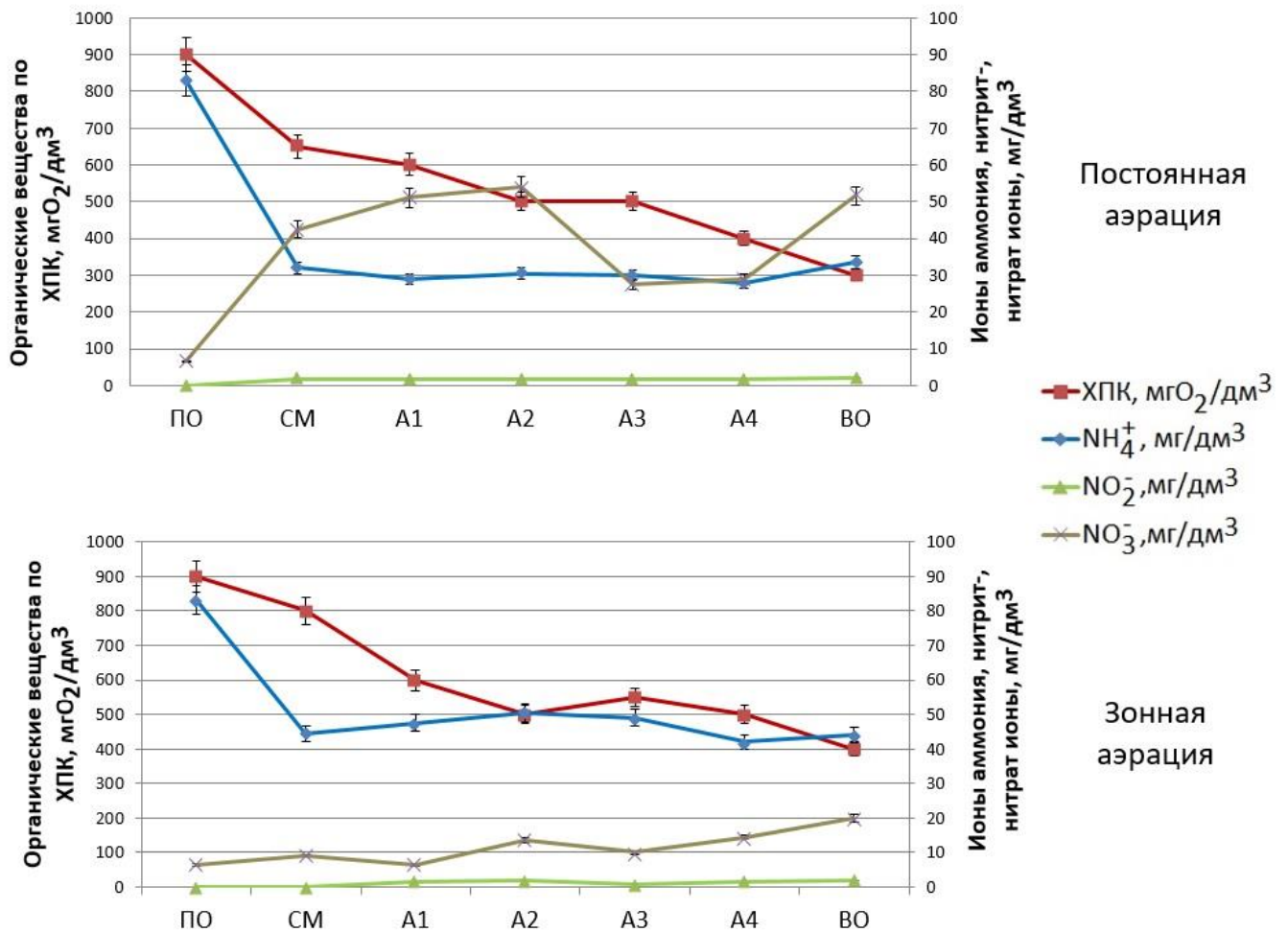


Рисунок 3.14 – Мониторинга состава сточных вод в ходе опытно-промышленных испытаний

Согласно данным, представленным на рисунке 3.14, на контрольной линии с постоянной аэрацией (при содержании кислорода от 3 до 5 мг/дм³) степень удаления органических веществ и ионов аммония составила 67 % и 60 %, соответственно.

На опытной линии с зонной аэрацией (при содержании кислорода на уровне 1-2 мг/дм³) эффективности удаления органических веществ и ионов аммония – 56 % и 47 %, соответственно.

Снижение показателей очистки при понижении содержания кислорода на опытной линии закономерно, поскольку большинство микроорганизмов активного ила представлены аэробными микроорганизмами [126]. Однако

снижение эффективности удаления органических веществ и ионов аммония в пределах допустимых значений позволяет сделать вывод о незначительном влиянии режима аэрации на работу очистной станции в целом.

Отдельного внимания требует нитрификация в связи с чувствительностью данного процесса к содержанию растворенного кислорода в среде.

В условиях постоянной аэрации в очищенной воде накапливается значительное количество нитрат-ионов (около 53 мг/дм³) и небольшое количество нитрит-ионов (около 4 мг/дм³), что говорит об удовлетворительном протекании аэробной нитрификации. В условиях зонной аэрации в очищенной воде наблюдаются незначительные содержания нитрит- и нитрат-ионов: около 2 мг/дм³ и 20 мг/дм³, соответственно [123].

Это может быть связано с развитием бактерий, осуществляющих анаэробное окисление ионов аммония, известное в литературе как Анаммокс-процесс. В условиях пониженного содержания кислорода для анаэробных Анаммокс-бактерии в толще иловых хлопьев могут возникать условия для развития и окисления аммонийного азота до молекулярного азота при помощи кислорода, связанного в нитрит-ионах [127].

Таким образом, в процессе опытно-промышленных испытаний с созданием условий для интенсивного протекания процесса фосфатаккумуляции показано, что чередование кислородных режимов в аэротенках очистных сооружений и, таким образом, реализация принципа зонной аэрации значительно увеличивает эффективность биологической дефосфатации сточных вод в сравнении с протеканием процесса в условиях постоянной аэрации. На основании полученных результатов было сформулировано техническое предложение, описанное для реализации процесса дефосфатации сточных вод на БТИ-БОС с. Кошаково (Приложение Б).

3.4.1 Экономическое обоснование технического предложения по интенсификации процесса биологической дефосфатации сточных вод

В данной работе рассматривается биологическая очистка сточных вод очистных сооружениях БОС с.Кощаково. Суточный объем сточных вод составляет $Q = 400 \text{ м}^3/\text{сут}$, а годовой – $146000 \text{ м}^3/\text{год}$. Режим работы непрерывный.

3.4.1.1 Расчет капитальных затрат на реализацию проекта

Расчет стоимости основных производственных фондов и амортизационных отчислений [128,129].

Основные производственные фонды включают в себя здания, сооружения и оборудование. Стоимость зданий и сооружений, а также сумма их амортизации представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Стоимость зданий и сумма амортизации

Наименование зданий и сооружений	Стоимость, руб.	Амортизационные отчисления	
		Норма, %	Сумма, руб.
Здания	1700000	2	340000

Расчет капитальных затрат на сооружения и годовой суммы амортизационных отчислений приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Расчет капитальных затрат на сооружения и годовой суммы амортизационных отчислений

Наименование сооружения	Единицы измерения	Количество, единиц	Стоимость, руб.		Амортизационные отчисления	
			единицы	Общая	Норма %	сумма, руб.
Комплексный модульный комплект	шт	1	-	15000000	7	1050000

Расчет капитальных затрат на оборудование и годовой суммы амортизационных отчислений приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Расчет капитальных затрат на оборудование и годовой суммы амортизационных отчислений

Наименование оборудования	Единицы измерения	Количество единиц оборудования	Стоимость, руб.		Амортизационные отчисления	
			единицы	Общая	норма, %	сумма, руб.
1.Центробежный насос типа СМ-150-125-315	шт.	2	35000	70000	10	7000
2.Турбо воздуходувка типа ТВ-80-1,6	шт.	1	570884	570884	10	57088,4
Всего:				640884		64088,4

На основании приведенных расчетов в таблице 3.11 составляется сводная смета капитальных затрат на основные фонды и определяется укрупненная структура основных фондов.

Таблица 3.13 – Сводная смета капитальных затрат и структура основных фондов

Элементы ОПФ	Стоимость	
	руб.	% к итогу
Здания	1700000	9,8
Сооружения	15000000	86,5
Оборудование	640884	3,7
Итого:	17340884	100

Капитальные вложения (КВ) рассчитываются (формула 3.6) как сумма стоимости основных производственных фондов (ОПФ) и нормируемых оборотных средств (НОС) по формуле

$$КВ = ОПФ + НОС \quad (3.6)$$

Нормируемые оборотные средства (НОС) принимаются в размере 5 % от стоимости основных производственных фондов (формула 3.7):

$$НОС = 0,05 \cdot ОПФ, \quad (3.7)$$

$$\text{НОС} = 0,05 \cdot 17340884 = 867044,2 \text{ руб.}$$

Общая сумма капитальных вложений составляет по формуле 3.6 составляет:

$$\text{КВ} = 17340884 + 867044,2 = 18207928,2 \text{ руб.}$$

3.4.1.2 Расчет численности персонала и фонда заработной платы

Баланс рабочего времени одного рабочего приведен в таблице 3.14.

Таблица 3.14– Баланс рабочего времени одного среднесписочного рабочего

Показатели	Для основных рабочих, 12-часовой рабочий день, 2- часовая смена	Для руководителей и специалистов
Календарный фонд времени, Т _{кал.}	365	365
Выходные и праздничные дни	179	119
Номинальный фонд рабочего времени, Т _{ном}	186	246
Продолжительность отпуска	28	30
Выполнение гособязанностей	2	2
Невыходы, регламентированные законом	8	5
Эффективный фонд рабочего времени, Тэф.:		
в днях	148	209
в часах	1776	1672

3.4.1.3 Расчет заработной платы основных рабочих

Определение численности основных производственных рабочих и расчет фонда их заработной платы.

Затраты на оплату труда работников включают сумму заработной платы работников, получаемую ими «на руки»; налог на доходы физических лиц (далее – НДФЛ); страховые взносы в пенсионный фонд РФ, федеральный фонд обязательного медицинского страхования РФ, федеральный фонд социального страхования РФ.

Ставка НДФЛ в 2023 г. составляет 13 %. Плательщиком этого налога является сам работник. Организация-работодатель удерживает этот налог из зарплаты работника и перечисляет в бюджет.

Тарифы страховых взносов во внебюджетные фонды на 2023 г. составили 30 %. Предусмотрены дополнительные тарифы страховых взносов 2 % на страхование производственного травматизма.

Для основных производственных рабочих рассчитываются сменные, явочные и списочные составы по профессиям и разрядам. Результаты расчета представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Численность и часовые тарифные ставки основных производственных рабочих

Наименование профессии	Разряд	Часовая тарифная ставка, руб.	Численность рабочих		
			Сменная	Явочная	Списочная
Аппаратчик очистки сточных вод	1	61,00	1	1	3

Списочное число рабочих определяется по формуле 3.8:

$$P_{\text{сп}} = P_{\text{яв}} \cdot (T_{\text{кал}} / T_{\text{эф}}), \quad (3.8)$$

где $P_{\text{яв}}$ – явочное число рабочих в сутки, чел.

$$P_{\text{сп}} = 1 \cdot (365 / 148) = 3 \text{ чел.}$$

Тарифный фонд заработной платы основных производственных рабочих рассчитывается по формуле 3.9:

$$Z_{\text{тар}} = T_{\text{эф}} \cdot Ч_{\text{спис}} \cdot Z_{\text{ч}}, \quad (3.9)$$

где $T_{\text{эф}}$ – эффективный фонд времени, ч;

$Ч_{\text{спис}}$ – списочная численность рабочих, чел;

$Z_{\text{ч}}$ – часовая тарифная ставка рабочих, руб.

$$Z_{\text{тар}} = 1776 (3 \cdot 61,00) = 325008 \text{ руб}$$

Премия на данном производстве составляет 50 % к тарифному фонду (формула 3.10):

$$П = 0,5 \cdot Z_{\text{тар}}, \quad (3.10)$$

$$\Pi = 0,5 \cdot 325008 = 162504 \text{ руб.}$$

Доплата за вечернее время рассчитывается по формуле 3.11:

$$D_{\text{вечер}} = Z_{\text{тар}} \cdot 0,5/6, \quad (3.11)$$

$$D_{\text{вечер}} = 325008 \cdot 0,5/6 = 27084 \text{ руб.}$$

За работу в ночное время определяется по формуле 3.12:

$$Z_{\text{ноч}} = (Z_{\text{тар}} \cdot K_{\text{ноч}})/3, \quad (3.12)$$

где $K_{\text{ноч}}$ - коэффициент доплат к тарифной ставке, $K_{\text{ноч}} = 1,5$ (150 %).

$$Z_{\text{ноч}} = (325008 \cdot 1,5)/3 = 162504 \text{ руб.}$$

За работу в праздничные дни определяется по формуле 3.13:

$$Z_{\text{праздн.}} = 24 \cdot 15 (1 \cdot 61,00) = 21960 \text{ руб} \quad (3.13)$$

Фонд основной заработной платы состоит из тарифного фонда и всех доплат (формула 3.14):

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{тар}} + \Pi + D_{\text{вечер}} + Z_{\text{ноч}} + Z_{\text{праздн.}} \quad (3.14)$$

$$Z_{\text{осн}} = 325008 + 162504 + 27084 + 162504 + 21960 = 699060 \text{ руб.}$$

Дополнительный фонд заработной платы принимается в размере 25 % от основного фонда заработной платы (формула 3.15):

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{осн}} \cdot 0,25, \quad (3.15)$$

$$Z_{\text{доп}} = 699060 \cdot 0,25 = 174765 \text{ руб}$$

Годовой фонд заработной платы основных производственных рабочих рассчитывается по формуле 3.16:

$$Z_{\text{год}} = (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \cdot K, \quad (3.16)$$

где K – величина поясного коэффициента ($K = 1$).

$$Z_{\text{год.}} = (699060 + 174765) \cdot 1 = 873825 \text{ руб.}$$

Удельная зарплата основных производственных рабочих учитывается самостоятельной статьей в калькуляции (формула 3.17):

$$Z_{\text{уд}} = Z_{\text{год}} / \Pi, \quad (3.17)$$

где Π – годовой объем сточных вод, $\Pi = 146000 \text{ м}^3$.

$$Z_{\text{уд}} = 873825 / 146000 = 5,99 \text{ руб/ м}^3$$

Обязательные страховые взносы (ОбСВ) составляют 32 % от годового фонда заработной платы (формула 3.18):

$$\text{ОбСВ} = Z_{\text{год}} \cdot 0,32, \quad (3.18)$$

$$\text{ОбСВ} = 873825 \cdot 0,32 = 279624 \text{ руб.}$$

Средняя месячная зарплата основных рабочих определяется по формуле 3.19:

$$Z_{\text{ср.м}} = Z_{\text{год}} / (P_{\text{сп}} \cdot 12), \quad (3.19)$$

$$Z_{\text{ср.м}} = 873825 / (3 \cdot 12) = 24273 \text{ руб.}$$

В калькуляцию включается также отчисления по ОбСВ (формула 3.20):

$$Z_{\text{уд.ОбСВ}} = (Z_{\text{год}} \cdot 0,32) / П, \quad (3.20)$$

$$Z_{\text{уд.ОбСВ}} = (873825 \cdot 0,32) / 146000 = 1,92 \text{ руб/м}^3.$$

3.4.1.4 Расчет фонда заработной платы руководителей, специалистов, служащих

Расчет производится на основе списочной численности работников этих категорий, их должностных окладов. Расчет фонда заработной платы руководителей, специалистов, служащих представлен в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Расчет фонда заработной платы руководителей, специалистов, служащих

Наименование профессии	Численность, чел.	Оклад в месяц, руб.	Годовой фонд з/п, руб.	Доплаты		Годовой фонд з/п, руб.
				%	Сумма, руб.	
Инженер-технолог	1	34000	408000	50	204000	612000

Годовой фонд заработной платы всех рабочих определяется по формуле (3.21). Количество рабочих: 3 человека.

$$Z_{\text{Годрабоч.}} = Z_{\text{Годосн.}} + Z_{\text{Год. всп.}}, \quad (3.21)$$

$$Z_{\text{Год. Рабоч.}} = 873825 + 0 = 873825 \text{ руб}$$

Среднегодовая заработная плата одного рабочего рассчитывается по формуле 3.22:

$$Z_{\text{ср. рабоч}} = Z_{\text{Год. рабоч}} / P_{\text{сп1}}, \quad (3.22)$$

где $P_{\text{сп1}}$ – количество рабочих, чел.

$$Z_{\text{ср. рабоч}} = 873825 / 3 = 291275 \text{ руб}$$

Годовой фонд заработной платы всех работающих определяется по формуле 3.23:

$$Z_{\text{год. раб-щих}} = Z_{\text{год. рабоч.}} + Z_{\text{год. служ.}}, \quad (3.23)$$

$$Z_{\text{год. раб-щих}} = 873825 + 612000 = 1485825 \text{ руб}$$

Количество работающих: $3 + 1 = 4$ человека.

Среднегодовая заработная плата одного работающего определяется по формуле 3.24:

$$Z_{\text{ср. раб-щих}} = Z_{\text{год. раб-щих}} / P_{\text{сп2}}, \quad (3.24)$$

где $P_{\text{сп2}}$ – количество работающих, чел.

$$Z_{\text{ср. Раб-щих}} = 1485825 / 4 = 371456 \text{ руб.}$$

Производительность одного рабочего определяется по формуле 3.25:

$$ПТ_{\text{рабоч}} = П / P_{\text{сп1}}, \quad (3.25)$$

$$ПТ_{\text{рабоч}} = 146000 / 3 = 48667 \text{ м}^3/\text{чел.}$$

Производительность одного работающего определяется по формуле 3.26:

$$ПТ_{\text{раб-щих}} = П / P_{\text{сп 2}}, \quad (3.26)$$

$$ПТ_{\text{раб-щих}} = 146000 / 4 = 36500 \text{ м}^3/\text{чел.}$$

3.4.1.5 Расчет себестоимости продукции

Расчет нормы расхода сырья и материалов на калькуляционную единицу представлен в таблице 3.17

Таблица 3.17 – Расчет нормы расхода сырья и основных материалов на калькуляционную единицу

Наименование сырья	Единицы, измерения	Годовая потребность по мат. балансу	Объем сточных вод	Норма расхода на кальк. единицу
Оксихлорид алюминия (ОХА)	кг/м ³	1860	146000	0,0016

Данная статья расходов связана с необходимостью применения коагулянтов для удаления фосфат-ионов из сточных вод. На очистных сооружениях БТИ-БОС

с. Кошаково применяют оксихлорид алюминия (ОХА), с содержанием оксида алюминия (III) около 30 % и стоимостью 80 руб./кг.

Для глубокого удаления фосфат-ионов из сточных вод реагентный препарат по стехиометрическому соотношению должен вноситься в количестве 1,6 мг/дм³ ОХА на каждый 1 мг/дм³ фосфат-ионов. Поскольку два режима аэрации отличаются степенью удаления фосфат-ионов, изменится доза ОХА, необходимой для связывания остаточного количества фосфатов после узла биологической очистки. Средние значения содержания фосфат-ионов в поступающей и очищенной воде приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Концентрации фосфат-ионов в процессе очистки сточной воды

Показатель	Постоянная аэрация	Зонная аэрация
Фосфат-ионы в поступающей воде, мг/дм ³	27	27
Фосфат-ионы, удаленные в ходе очистки, мг/дм ³	11,07	22,14
Фосфат-ионы, оставшиеся после очистки, мг/дм ³	15,93	4,86

Согласно результатам, приведенным в таблице 3.9, на линии с постоянной аэрацией остаточное количество фосфат-ионов значительно превышает тот же показатель линии с зонной аэрацией.

В случае линии с постоянной аэрацией расход сырья составляет 10,2 кг ОХА/сутки, а для зонной аэрации – 3,1 кг ОХА/сутки. Таким образом годовая сумма затрат на покупку дефосфатирующего реагента для линии с постоянной аэрацией составляет 297840 рублей, для линии с зонной аэрацией – 90520 рублей.

Поскольку в очистку поступают воды с хозяйственно-бытового стока биодобавки по фосфору и азоту не требуются. В стоке имеются все необходимые компоненты для дальнейшего развития биомассы и очистки воды.

3.4.1.6 Расчет годового расхода электроэнергии на технологические цели

Характеристики оборудования, необходимые для расчета расхода электроэнергии приведены в таблице 3.18.

Таблица 3.18 – Расчет годового расхода электроэнергии

Наименование электрооборудования	Единица мощность, кВт	Количество единиц, шт	Суммарная мощность, кВт	Эффективный фонд времени работы оборудования, ч	Потребная электроэнергия, кВт/ч
1.Центробежный насос типа СМ-150-125-315	6	2	12	2912	34944
2.Турбовоздуходувка типа ВРМТ 10/2	20	1	20	8760	175200
Всего:					210144

Расчет годового расхода электроэнергии на двигательные цели производится по формуле 3.27

$$\mathcal{E}_{\text{дв.}} = (\mathcal{E}_{\text{теор.}} \cdot K_{\text{спр.}}) / (K_{\text{эл. сети}} \cdot K_{\text{дв.}}), \quad (3.27)$$

где $\mathcal{E}_{\text{теор.}}$ – годовой расход электроэнергии, кВт/ч;

$K_{\text{спр.}}$ – коэффициент спроса, учитывающий неравномерность работы двигателей (0,8);

$K_{\text{эл.сети}}$ – коэффициент потерь в электросети (0,97);

$K_{\text{дв.}}$ – коэффициент потерь в электродвигателе (0,95).

Поскольку две линии очистных сооружений отличаются режимом аэрации, расход электроэнергии будет различаться. Коэффициент спроса представляет собой отношение эффективного времени работы биореакторов к нормативному. Для линии с постоянной (и зонной аэрацией коэффициенты спроса равны 1 и 0,75, соответственно, поскольку в случае постоянной аэрации компрессоры подавали воздух в четыре азротенка, а в случае зонной аэрации – в три.

$$\mathcal{E}_{\text{дв.1}} = (210144 \cdot 1) / (0,97 \cdot 0,95) = 228045,6 \text{ кВт/ч.}$$

$$\mathcal{E}_{\text{дв.1}} = (210144 \cdot 0,75) / (0,97 \cdot 0,95) = 171034,2 \text{ кВт/ч.}$$

Норма расхода на калькуляционную единицу определяется по формуле 3.28

$$H_3 = \mathcal{E}_{\text{дв}} / \Pi, \quad (3.28)$$

$$H_{3,1} = 228045,6 / 146000 = 1,57 \text{ кВт/ч.}$$

$$H_{3,2} = 182436,462 / 146000 = 1,25 \text{ кВт/ч.}$$

3.4.1.7 Расчет расходов на содержание и эксплуатацию оборудования

Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования рассчитываются на годовой объем продукции (таблица 3.19).

Таблица 3.19 – Смета расходов по содержанию и эксплуатации оборудования

Наименование статей	Сумма, руб.	Методика расчета
1.Содержание оборудования	19226,5	3 % от стоимости оборудования, табл. 3.11
2.Текущий ремонт оборудования	19226,5	3 % от стоимости оборудования
3.Капитальный ремонт оборудования	32044,2	5 % от стоимости оборудования
4.Амортизация оборудования	64088,4	Из таблицы 3.11
Итого:	134585,6	
Прочие расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	13458,5	10 % от суммы статей 1-4
Всего:	148044,1	

Расходы по содержанию и эксплуатации оборудования на калькуляционную единицу готовой продукции рассчитываются по формуле 3.29:

$$P_{\text{сод.об.}(уд)} = P_{\text{сод.об.}} / \Pi, \quad (3.29)$$

где $P_{\text{сод.об}}$ – суммарные расходы на содержание и эксплуатацию оборудования.

$$P_{\text{сод.об}} = 148044,1 / 146000 = 1,01 \text{ руб/м}^3$$

3.4.1.8 Расчет цеховых расходов

Цеховые расходы рассчитываются на годовой объем продукции путем составления сметы представленной в таблице 3.20.

Таблица 3.20 – Смета цеховых расходов

Статьи затрат	Сумма, руб.	Методика расчета
1.Заработная плата руководителей, специалистов и служащих	612000	Из таблицы 3.16
2.ОбСВ	195840	32 % от величины статьи 1
3.Текущий ремонт зданий и сооружений	150000	1 % от стоимости зданий и сооружений
4.Капитальный ремонт зданий и сооружений	300000	2 % от стоимости зданий и сооружений
5.Амортизация зданий и сооружений	1050000	Из таблиц 3.10
6.Содержание зданий и сооружений	450000	3 % от стоимости зданий и сооружений
7.Охрана труда и техника безопасности	8000	2000 руб/чел.
Итого:	2765840	

Цеховые расходы рассчитываются на калькуляционную единицу по формуле 3.30:

$$P_{\text{цех. уд}} = P_{\text{цех}} / \Pi, \quad (3.30)$$

где $P_{\text{цех}}$ – суммарные цеховые расходы, руб.

$$P_{\text{цех.уд}} = 2765840 / 146000 = 19,94 \text{ руб/м}^3.$$

3.4.1.9 Калькуляция себестоимости очистки сточных вод

Калькуляция себестоимости проектируемого производства представлена в таблице 3.21.

Таблица 3.21 – Калькуляция себестоимости очистки сточных вод

Статьи затрат	Ед. изм.	Цена единицы, руб.	Постоянная аэрация			Зонная аэрация		
			Нормы расхода	Общая сумма расхода	Стоимость на весь выпуск, руб.	Нормы расхода	Общая сумма расхода	Стоимость на весь выпуск, руб.
1. Сырье и материалы	кг/м ³	80 руб/кг	0,0016	10,2 кг	297840	0,0016	3,1 кг	90520
2. Топливо и энергия на технологические цели: электроэнергия	кВт/ч	6,17	1,57	228045,6	1407041,4	1,25	171034,2	1055281,1
3. Заработная плата с ОбСВ: - зарплата основных рабочих	руб.				873825			873825
- ОбСВ (32%)	руб.				279624			279624
4. Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	руб.				148044,1			148044,1
5. Цеховые расходы	руб.				2765840			2765840
Цеховая себестоимость	руб.				19,94			13,36
ИТОГО					5772214,5			5213134,2

Как видно из данных в таблице 3.21 стоимость очистки сточной воды в режиме постоянной аэрации требует вложений в размере 5772214,5 рублей, а зонной – 5213134,2 рублей. Это связано с изменением расхода дефосфатирующего реагента и количества аэротенков, в которых необходима аэрация.

Технико-экономические показатели сооружений по очистке сточных вод приведены в таблице 3.22.

Таблица 3.22 – Технико-экономические показатели производства

Показатели	Единица изм.	По проекту
1. Годовой объем сточных вод	м ³ /год	146000
2. Капитальные вложения	тыс. руб.	17340,884
3. Численность работающих:		
– всего,	чел.	4
– в том числе рабочих	чел.	3
4. Производительность труда:		
– одного работающего,	м ³ /чел.	48667
– одного рабочего	м ³ /чел.	36500
5. Среднегодовая заработная плата:		
– одного рабочего	тыс. руб.	291275
- одного работающего	тыс. руб.	371456
6. Цеховая себестоимость очистки 1 м ³ воды	руб.	19,94 – 1 линия 13,36 – 2 линия

Следующая статья расходов связана с оценкой величины экономического ущерба от загрязнения водных объектов [130]. При реализации технического предложения без применения дефосфатирующих реагентов количество фосфат-ионов в очищенных водах значительно уменьшается.

Предельно допустимая концентрация (ПДК) фосфат-ионов в водах рыбохозяйственного назначения составляет 0,2 мг/дм³ [131]. В очищенной воде при постоянной аэрации остаточное количество фосфат-ионов составляет 15,93 мг/дм³, а при зонной аэрации – 4,86 мг/дм³. Величина сброса загрязняющего вещества сверх нормы ($C_{\text{сверх}}$, мг/дм³) определяется по следующей формуле (3.31):

$$C_{\text{сверх}} = C_{\text{факт}} - C_{\text{ПДК}}, \quad (3.31)$$

где $C_{\text{факт}}$ – фактическая концентрация загрязняющего вещества, мг/дм³,

$C_{\text{ПДК}}$ – предельно допустимая для сброса концентрация загрязняющего вещества, мг/дм³.

$$C_{\text{сверх1}} = 15,93 - 0,2 = 15,73 \text{ мг/дм}^3,$$

$$C_{\text{сверх2}} = 4,86 - 0,2 = 4,66 \text{ мг/дм}^3.$$

Массовый объем сброса на годовой выпуск продукции ($T_{\text{сверх}}$, тонн/год) рассчитывается по следующей формуле (3.32):

$$T_{\text{сверх}} = C_{\text{сверх}} \cdot П / 10^6, \quad (3.32)$$

где 10^9 – коэффициент перевода единиц измерения массы в тонны.

$$T_{\text{сверх1}} = 15,73 \cdot 146000 / 10^6 = 2,2 \text{ тонн/год},$$

$$T_{\text{сверх2}} = 4,66 \cdot 146000 / 10^6 = 0,7 \text{ тонн/год}.$$

Стоимость сброса 1 тонны фосфат-ионов (по фосфору) составляет 3679,3 рублей/тонна [132]. Отсюда следует, что стоимость экономического ущерба от сброса фосфат-ионов составляет 2671,2 рубля в случае очистки сточных вод при постоянной аэрации и 849,9 рублей – при зонной аэрации.

При реализации технического предложения сумма предотвращенного экологического ущерба составляет 1821,3 рубля в год.

Таким образом, суммарная величина снижения затрат для очистки сточных вод объемом 400 м³/сутки может достигать около 1 млн. рублей в год за счет снижения затрат на закупку дефосфатирующих реагентов и потребляемую компрессорами электроэнергию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены две накопительные культуры изолятов ФАО из активного ила, обладающих способностью к фосфатаккумуляции. Проведен элементный анализ внутриклеточных накоплений методом сканирующей электронной микроскопии, подтверждающий депонирование фосфора в ходе моделирования процесса биологической дефосфатации в количестве 38 % от начального содержания элемента в клетках. Проведена идентификация изолята Р на основе анализа последовательности 16S рРНК, по результатам которого культура в составе изолята отнесена к *Pseudomonas atacamensis* с соответствием 99,82 %.

2. В ходе моделирования процесса дефосфатации за счет микробной фосфатаккумуляции с использованием исследуемых изолятов, было установлено, что максимальная степень удаления фосфат-ионов из модельной среды составляет до 45 % и 15 % для изолятов А и Р, соответственно. При этом была определена удельная дефосфатирующая активность, которая составляет в среднем $1,1 \times 10^{-10}$, $0,3 \times 10^{-10}$ мг/дм³×КОЕ для изолятов А и Р, соответственно.

3. На основании результатов статистического анализа массива экспериментальных данных процесса биологической дефосфатации коммунально-бытовых сточных вод за 2020-2021 г.г. с эффективностью от 77 до 89 % в масштабе производственных очистных сооружений, оценено влияние факторов среды на эффективность дефосфатации сточных вод. Результаты корреляционного и регрессионного анализа показали значимое влияние концентрации растворенного кислорода на микробную фосфатаккумуляцию в процессе удаления фосфатов из сточных вод.

4. Опытно-промышленные испытания технического предложения по реализации принципа зонной аэрации, основанного на чередовании условий с пониженным и повышенным уровнем растворенного кислорода в аэротенках очистных сооружений БТИ-БОС с. Кощакново, продемонстрировали увеличение эффективности биологической дефосфатации сточных вод на 40-45 % по сравнению с режимом постоянной аэрации.

5. Отмечено, что изменение режима аэрации не оказало значительного негативного влияния на эффективность очистки сточных вод по таким показателям как концентрация органического вещества по ХПК, ионов аммония, нитрит-, нитрат-ионов. Помимо предотвращенного ущерба окружающей природной среде, предложенная модернизация отличается экономической эффективностью за счет снижения затрат, связанных с использованием дефосфатирующих реагентов и потреблением электроэнергии для аэрации сточных вод. Суммарная величина снижения затрат на очистных сооружениях БТИ-БОС с. Коцаково для очистки сточных вод объемом 400 м³/сутки может достигать около 1 млн. рублей в год.

Разработанные в диссертационной работе подходы к реализации режимов биологической очистки сточных вод, направленные на развитие фосфатаккумулялирующих групп микроорганизмов в составе микробного сообщества активного ила, и сформулированные технические и технологические предложения по эффективной дефосфатации сточных вод представляют собой основу для интенсификации процессов биологического удаления фосфат-ионов из сточных вод и модернизации очистных сооружений предприятий ЖКХ и промышленных объектов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- РНК – рибонуклеиновая кислота
- ДНК – дезоксирибонуклеиновая кислота
- АТФ – аденозинтрифосфат
- АДФ – аденозиндифосфат
- НАДН – никотинамидадениндинуклеотид
- ФАДН₂ – флавинадениндинуклеотид
- ФАО – фосфатаккумулялирующие организмы
- GAO – glycogen accumulating organisms
- БПК – биохимическое потребление кислорода
- ХПК – химическое потребление кислорода
- СВ – сточные воды
- НР – нитратный рецикл
- ЦАИ – циркуляционный активный ил
- ОСВ – очищенные сточные воды
- БОС – биологические очистные сооружения
- 16S рНК – 16S рибосомные рибонуклеиновые кислоты
- ГАО – гликогенаккумулялирующие микроорганизмы
- ПНО – полимерные насыщенные оксикислоты
- ОВП – окислительно-восстановительный потенциал
- ЛЖК – летучие жирные кислоты
- ПГБ – полигидроксibuтират
- ПГА – полигидроксиалканат
- ГВП – гидравлическое время пребывания
- США – Соединенные штаты Америки
- РФ – Российская Федерация
- ЗВКС – Зеленодольскводоканал Сервис
- БТИ – Биотехинжиниринг

Поли-Р – полифосфат

КОЕ – колониобразующая единица

НДФЛ – налог на доходы физических лиц

ОПФ – основной производственный фонд

КВ – капитальные вложения

НОС – нормируемые оборотные средства

ОХА – оксихлорид алюминия

ОбСВ – обязательные страховые взносы

ПДК – предельно допустимая концентрация

АО – акционерное общество

MS – Microsoft

UCT – University of Cape Town

ЖКХ – жилищно-коммунальное хозяйство

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жмур, Н.С. Интенсификация процессов удаления соединений азота и фосфора из сточных вод / Н.С. Жмур. – Москва : АКВАРОС, 2001. – 96 с.
2. Харькина, О.В. Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод / О.В. Харькина. – Волгоград: изд-во «Панорама», 2015. – 433 с.
3. Крюков, В.И. Генетика. Часть 1. Введение в генетику. Молекулярные основы наследственности / В.И. Крюков. – Орёл: Изд-во Орёл-ГАУ, 2006. – 192 с. с ил
4. Браун, Т. Химия – в центре наук. В 2 частях / Т. Браун, Г.Ю. Лемей. – М.: Мир, 1983. – 520 с.
5. Книги для всех [Электронный ресурс]. – Режим доступа открытый. URL: <http://lib4all.ru/> (дата обращения 19.11.2016)
6. Залетова, Н.А. Удаление азота и фосфора для городских станций аэрации / Н.А. Залетова // Водоснабжение и санитарная техника. – 1993. – №9. – С.3-5.
7. Разумовский, Э.С. Удаление биогенных элементов из городских сточных вод / Э.С. Разумовский, Н.А. Залетова // Водоснабжение и санитарная техника – 1991. – №6. – С.28-30.
8. Пахомов, А.Н. Опыт эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод от соединений азота и фосфора / А.Н. Пахомов, С.А. Стрельцов, М.Н. Козлов, О.В. Харькина, М.Г. и др. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 10. Ч.1. – С.35-41.
9. Чистая экология [Электронный ресурс]. Режим доступа открытый. URL: <http://www.clean-ecology.ru/> (дата обращения 05.11.2016)
10. Уразаев Н.А. Сельскохозяйственная экология / Н.А. Уразаев, А.А. Вакудин, А.В. Никитин и др. – М.: Колос, 2000. – 304 с.: ил.
11. Вальков В.Ф. Экология почв: Учебное пособие для студентов вузов. Часть 3. Загрязнение почв / В.Ф. Вальков, К.Ш. Казеев, С.И. Колесников. – Ростов-на-Дону: УПЛ РГУ, 2004. – 54 с.

12. Маркевич, Р.М. Биологическое удаление из сточных вод азота и фосфора в аэротенках Минской очистной станции аэрации / Р.М. Маркевич, М.В. Рымовская, О.И. Лазовская, Н.В. Холодинская // Труды БГТУ. Серия 4: Химия, технология органических веществ и биотехнология – 2009. – Т. 1. № 4. – С.242-246.
13. Справочное пособие к СНиП 2.04.04 // Проектирование сооружений для очистки сточных вод. – Москва: Стройиздат, 1990. – 190 с.
14. Жмур, Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н. С. Жмур. – М.: АКВАРОС, 2003. – 512 с.
15. Свергузова, С.В. Шлаковые отходы в водоочистке / С.В. Свергузова, Н.Ю. Кирюшина, Г.И. Тарасова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2010. – № 4. – С. 133-139.
16. Sverguzova, S.V. Purification of waste water from phosphates by arsfuranceslags. / S.V. Sverguzova, T.A. Vasilenko, J.A. Sverguzova, A.Y. Chasovitin // *Microzanieczyszczenia w środowiskuczłowieka: mat. NaukowyInternationalconf.* Częstochowa, Poland. – 2003. – P. 13-22.
17. Salomons, W.U. Metals in the hydrocycle / W.U. Salomons // Springer-Verlag, Berlin. – 1994. – P. 97-126.
18. Бучило, Э.К. Очистка сточных вод травильных и гальванических отделений / Э.К. Бучило. – М. : Металлургия, 1974. – 200 с.
19. Brierly, C.L. Metal immobilization using bacteria, in *Microbial Mineral Recovery* / H.L. Erlic, C.L. Brierly // McGraw-Hill, New York. – 2011. – P. 303-324.
20. Wilson, M. Biosorption for the removal of heavy metals from industrial wastewaters. / M. Wilson, R. Edyvean // *I Chem E Symposium Series.* – 1993. – № 132. – P. 185-196.
21. Смирнов, Д.Н. Очистка сточных вод в процессах обработки металлов / Д.Н. Смирнов, В.Е. Генкин. – М. : Металлургия, 1980. – 195 с.
22. Меркушев, Ю.Н. Технологии извлечения меди, никеля, цинка из отработанных концентрированных растворов / Ю.Н. Меркушев, В.Г. Маклецов,

В.Г. Петров // Гальванотехника, обработка поверхности и экология: тез. докл. Всесоюз. науч.-практ. конф., 2002. – М. : Издательский центр РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2002. – С. 74.

23. Смирнов А.Д. Сорбционная очистка воды / А.Д. Смирнов. – Л. : Химия, 1982. – 168 с.

24. Кушины, Дж.К. Удаление металлов из сточных вод / Дж.К. Кушины. – М. : Metallurgiya, 1987. – 147 с.

25. Свергузова, С.В. Введение в промышленную экологию : Учебное пособие / С.В. Свергузова. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2005. – 192 с.

26. Пат. Co2 с 5/12, B01k 1/00. Electrochemical contaminant removal from aqueous media / Lee sing Ki; патентообладатель: AndcoInc. –№ 3926754; заявл.16.02.1973, опубл. 25.05.1973.

27. Гинберг, А.М. Инженерная гальванотехника в приборостроении / А.М. Гинберг. – М. : Машиностроение, 1977. – 512 с.

28. Jayson, G.G. Adsorption of chromium from aqueous solution onto activated charcoal cloth / G.G. Jayson // Carbon. – 1993. –№31.–Р. 487-493.

29. Ипанов, Д.Ю. Очистка сточных вод от фосфатов и тяжелых металлов пылью электродуговых сталеплавильных печей – диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 03.02.08 / Ипанов Дмитрий Юрьевич – Белгород, 2015. – 150 с.

30. Родионов, А.И. Технологические процессы экологической безопасности : Учебник для студентов технических и технологических специальностей / А.И. Родионов, В.И. Клушин, В.Я. Систер. – 3-е изд., перераб. и доп. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2000. – 800 с

31. Порожнюк Л.А. Коллоидно-химические свойства пыли ЭДСП в процессах водоочистки / Л.А. Порожнюк, С.В. Свергузова Л.А. Порожнюк; Д.Ю. Ипанов; Шамшуров, Е.В. Новикова // Экология и промышленность России. – 2013, №7. – С. 22-25.

32. Запольский, А.К. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды / А.К. Запольский, А.А. Баран – Л. : Химия, 1987. –79 с.

33. Кирюшина, Н.Ю. Очистка сточных вод от ионов железа и цинка / Н.Ю. Кирюшина, Г.И. Тарасова // Международная научно-техн. конференция «Безопасность человека в современных условиях». – Харьков, 2010. – С. 236-237.
34. Харькина, О.В. Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод / О.В. Харькина. – Волгоград: изд-во «Панорама», 2015. – 433 с.
35. Свергузова, С.В. Адсорбционные свойства пыли электросталеплавильного производства. Коллоидно-химические свойства пыли ЭДСП в процессах водоочистки / С.В. Свергузова, Л.А. Порожняк, И.Г. Шайхiev // Экология и промышленность России. – 2013. – С. 22-25.
36. Шибека, Л.А. Исполнение природных и синтетических сорбентов в технологии очистки сточных вод / Л.А. Шибека, В.Н. Марцуль // Техника и технология защиты окружающей среды : Материалы докладов и международной научно-технической конференции.– Минск :БГТУ, 2002. – 139 с.
37. Степанова, С.В. Очистка модельных стоков, содержащих ионы тяжелых металлов, шелухой пшеницы / С.В. Степанова, И.Г. Шайхiev, С.В. Свергузова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова – 2014. - № 6 – С. 183-186.
38. Кельцев, Н.В. Основы абсорбционной техники / Н.В. Кельцев– М.: Химия, 1976. – 510 с.
39. Leyva-Ramos, R. Adsorption of Trivalent Chromium from aqueous onto activated Carbon / R. Leyva-Ramos, L. Fuentes-Rubio. – J. Chem. Tech. Biotechnol. – 1995. – 65 p.
40. Huang, C.P. The removal of chromium (VI) from dilute aqueous solution by activated carbon / C.P. Huang, M.N. Wu // Wat.Res. – 1977. – №11. – P. 673-679.
41. Williams, C.J. Optimization of metal adsorption by seaweeds and seaweed derivatives. / C.J. Williams and R.G.J. Edyvean // Process Safety and Environmental Protection. – 1997. – Vol. 75, № B1. – P.19-26.
42. Максимовец, Н.Г. Использование сорбентов на основе активизированного угля для борьбы с разливами нефти // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2006. – № 10. – С. 19-22.

43. Дударчик, В.М. Очистка сточных вод от металлов – экотоксикантов торфяными препаратами / В.М. Дударчик [и др.] // Химия и технология воды. – 2007. – Т. 29. – № 1. – С. 67-74.
44. Хасанов, И.Ю. К созданию сорбента из древесных опилок для сбора аварийных разливов нефти / И.Ю. Хасанов, В.И. Рогозин, Р.Ю. Хасанов // Трубопровод транспортировки нефти. – 1995. – № 8. – С. 22-26.
45. Самсуева, М.Н. Сорбенты из отходов ТЭС / М.Н. Самсуева, А.В. Житов // Успехи современного естествознания. – 2010. – № 10 – С. 54-55.
46. Свергузова, С.В. Использование шлака Оскольского электрометаллургического комбината для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов (Ni^{2+} и Cu^{2+}) / С.В. Свергузова, И.И. Проскурина // Сотрудничество для решения проблемы отходов : II Международная конф. – Харьков, 2005. – С. 2014-2018.
47. Свергузова, С.В. Использование металлургических шлаков / С.В. Свергузова, Н.Н. Василевич, И.И. Проскурина // Экономика природопользования и природоохраны : Сб. статей VIII Междунар. научно-практ. конф. – Пенза, 2005. – С. 198-200.
48. Свергузова, С.В. Использование шлака электросталеплавильного производства для очистки сточных вод / С.В. Свергузова, Т.А. Василенко // Сотрудничество для решения проблемы отходов : II Междунар. конф. – Харьков, 2005. – С. 201-203.
49. Свергузова, С.В. Использование отхода электросталеплавильного производства в качестве микроудобрения для почв / С.В. Свергузова, Т.А. Василенко // Сотрудничество для решения проблемы отходов : II Междунар. конф. – Харьков, 2005. – С. 208-210.
50. Ольшанская, Л.Н. Возможности применения сорбентов на основе отходов текстильного производства и отходов сельскохозяйственной переработки для очистки сточных вод от нефтепродуктов / Л.Н. Ольшанская, В.В. Дерепаскова, Н.А. Собгайда; // ЭТИ СГТУ.– 2009. – № 2. – 11 с.

51. Собгайда, Н.А. Влияние модифицированной шелухи пшеницы на ее сорбционные свойства к ионам Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} и Cu^{2+} / Н.А. Собгайда, Л. Н. Ольшанская, Ю.А. Макарова // Известия ВУЗов «Химия и химическая технология». – 2010. – Т. 53, № 11. – С. 36-40.

52. Кирюшина, Н.Ю. Шлаковые отходы в водоочистке / Н.Ю. Кирюшина, Г.И. Тарасова, С.В. Свергузова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2010. – № 4. – С. 133-139.

53. Свергузова, С.В. Разработка способа очистки модельных растворов от синтетических поверхностно-активных веществ / С.В. Свергузова, Ю.Н. Малахатка // Коммунальное хозяйство городов : Научно-техн. сборник.– Киев, 2010. – Вып. 93. – С. 162-166.

54. Собгайда, Н.А. Сорбционные свойства фильтров, изготовленных из отходов агропромышленного комплекса / Н.А. Собгайда, Ю.А. Макарова, Л.Н. Ольшанская // Вестник Харьковского нац. автомобильно-дорожн. ун-та : Сб. науч. трудов. – Харьков : ХНАДУ, 2011. – Вып. 52. – С. 115-120.

55. Свергузова, С.В. Шлак ОЭМК для очистки сточных вод / С.В. Свергузова, И.И. Проскурина // Экология, окружающая среда и здоровье населения Центрального Черноземья : Материалы Межд. науч-практ. конф. – Курск, 2005. – С. 66-67.

56. Чурбанова, И.Н. Микробиология / И.Н. Чурбанова – М.: Высшая школа, 1987. – 240 с.

57. Портал «Биология и биосфера». Режим доступа открытый. URL: <http://www.nextbiology.ru/> (дата обращения 19.11.2016)

58. Портал «Файловый архив студентов». Режим доступа открытый. URL: www.studfiles.ru (дата обращения 19.11.2016)

59. Еремина И. А. Микробиология : учебное пособие : для студентов вузов / И. А. Ерёмина . Федеральное агентство по образованию, Кемеровский технологический ин-т пищевой пром-сти. – 2-е изд., испр. и доп. – Кемерово : КемТИПП, 2007. – 111 с. : ил., табл.

60. Хенце, М. Очистка сточных вод: пер. с англ. / М. Хенце [и др.]. – М.: Мир, 2004. – 480 с.
61. Janssen, P. M. J. Praktijkervaringen met biologische P-verwijdering / P. M. J. Janssen // Symposium Fosfaatverwijdering, 5 jaar ervaring – The Netherlands, 1999 – P. 1-18.
62. Reddy K. R. Forms of soil phosphorus in selected hydrologic units of Florida Everglades / K. R. Reddy, Y. Wang, W. F. DeBusk, M. M. Fisher, S. Newman // Soil Sci. Soc. Am. – 1998.62. – P. 1134–1147.
63. Ekama, G. A. Influence of wastewater characteristics on process design. Theory, design and operation of nutrient removal activated sludge processes / G. A. Ekama, GvR. Marais // Water Research Commission – 1984. – P. 1-10.
64. Fuhs, G. W. Microbiological basis of phosphate removal in the activated sludge process for treatment of wastewater / G. W. Fuhs, M. Chen // Microbiol. Ecol. – 1975. – Vol. 2(2). – P. 119–138.
65. Malnou, D. Biological phosphorus removal: study of the main parameters / D. Malnou, M. Meganck, G. M. Faup and M. du Rostu // Wat. Sci. Tech. – 1984. – P.10-16.
66. Ekama, G. A. Biological excess phosphorus removal. Theory, design and operation of nutrient removal activated sludge processes / G. A. Ekama, GvR. Marais, I. P. Siebritz // Water Research Commission – 1984. – P. 1-32.
67. J. Manga A modification to the activated sludge model No. 2 based on the competition between phosphorus-accumulating-organisms and glycogen-accumulating organisms / Manga J., Ferrer J., Garcia-Usach F. and Seco A. // Proc. 1st World Conf. of IWA, 3(Wastewater Treatment Plants) – 2000. – P. 300-307.
68. Smolders G. J. F. Model of the anaerobic metabolism of the biological phosphorus removal process: stoichiometry and pH influence / G. J. F. Smolders, J. van der Meij, M. C. M. van Loosdrecht and J. J. Heijnen // Biotech. Bioeng – 1994 – № 43(6). – P. 461-470.

69. Wentzel M. C. Enhanced polyphosphate organism cultures in activated sludge systems. Part II: Experimental behaviour / M. C. Wentzel, G. A. Ekama, R. E. Loewenthal, P. L. Dold and GvR. Marais // *Water SA*. – 1989 – Vol. 15(2). – P. 71-88.
70. Janssen, P. Biological Phosphorus Removal / P. Janssen Meinema K M.J., H. F. // STOWA – 2001 – 214 p.
71. Janssen, P. M. J. Biological Phosphorus Removal. Manual for Design and Operation / P. M. J. Janssen, K. Meinema, H. F. van der Roest. // STOWA – 2002. – 224 p.
72. Hascoet, M. C. Influence of nitrates on biological phosphorus removal from wastewater / M. C. Hascoet, M. Florentz // *Water SA*. – 1985. – № 11(1). – P. 1-8.
73. Pillay, K. Factors affecting competition between polyphosphate and glycogen accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal: effect of dissolved oxygen concentration / K. Pillay, S. Kumari, F. M. Swalaha and F. Bux. – Cape Town WISA – 2012. – 122 p.
74. Biological Nutrient removal (BNR) Operation in Wastewater Treatment Plants // MOP 29: Water Environment Federation and American Society of Civil Engineers. Alexandria, VA. – N.Y. USA: WEF, McGraw-Hill. – 2009. – 613 p.
75. Jeyanayagam, S. True confessions of the biological nutrient removal process / S. Jeyanayagam // *Florida water resources journal*. – 2005. – P. 37-46.
76. Асонов Н.Р. Микробиология. 3 изд., перераб. и доп. / Н.Р. Асонов. – М.: Колос – 1997. – 352 с.
77. [Электронный ресурс] / Портал «Микробиологический атлас онлайн» – Режим доступа atlas.microumftgm.ro открытый. (Дата обращения 19.11.2016).
78. Skerman, V.B.D. Approved Lists of Bacterial Names / V.B.D. Skerman, V. McGowan, P.H.A. Sneath // *Int. J. Syst. Bacteriol* – 1980. – p.225-420.
79. Shaomei, He. Microbiology of 'Candidatus Accumulibacter' in activated sludge // He. Shaomei, K. D McMahon / *Microbial biotechnology* – 2011. – Vol. 4,5. – P. 603-619.
80. Lu, H Obtaining highly enriched cultures of *Candidatus Accumulibacter phosphates* through alternating carbon sources / H. Lu, A. Oehmen, B. Viridis, J. Keller, Z. Yuan // *Water Res*. – 2006. – Vol. 40 (20). – P. 3838–3848.

81. Maszenan, A.M. Three isolates of novel polyphosphate-accumulating gram-positive cocci, obtained from activated sludge, belong to a new genus, *Tetrasphaera* gen. nov., and description of two new species, *Tetrasphaera japonica* sp. nov. and *Tetrasphaera australiensis* sp. Nov // A.M. Maszenan, R.J. Seviour, B.K. Patel, P. Schumann, J. Burghardt, Y. Tokiwa, H.M. Stratton / Int J Syst Evol Microbiol. – 2000. – Vol. 50. – P. 593–603.
82. Liu, R. Research advances of *Tetrasphaera* in enhanced biological phosphorus removal: A review // R. Liu, X. Hao, Q. Chen, J. Li / Water research – 2019. – Vol. 166. – P. 115003-115016.
83. Хоулт Дж. Определитель бактерий Берджи (том 1,2) / Дж. Хоулт, Н. Криг, П. Снит. – М.: «Мир» – 1997. – 1168 с.
84. Petriglieri, F. *Candidatus Dechloromonas phosphoritropha* and *Ca. D. phosphorivorans*, novel polyphosphate accumulating organisms abundant in wastewater treatment systems // F. Petriglieri, C. Singleton, M. Peces, et al. / ISME – 2021. – Vol. 15. – P. 3605–3614.
85. Biological Nutrient Removal Processes and Costs. United States Environmental Protection Agency // Office of Water Washington DC 20460 (4305T). EPA-823-R-07-002. – 2007.
86. Wang N.A detailed ecosystem model of phosphorus dynamics in created riparian wetlands / N.Wang, W.J. Mitsch// Ecological Modelling. –2000. – No. 126. – P. 101-130.
87. Morales, L.M. Capability assessment of biological nutrient removal facilities / L.M. Morales [et al.] // Research Journal of Water Poll. Contr. Fed. – 1991. – V. 63 (6). – P. 900-909.
88. Мешенгиссер, Ю.М. Ретехнологизация сооружений очистки сточных вод / Ю.М. Мешенгиссер– М.: ООО Издательский Дом «Вокруг цвета» – 2012, – 211 с.: ил.
89. Яковлев, С. В. Биологическая очистка производственных сточных вод: Процессы, аппараты и сооружения / С. В. Яковлев, И. В. Скирдов, В. Н. Швецов и др.. Под ред. СВ. Яковлева. – М.: Стройиздат – 1985.– 208 с. ил.

90. Бесков, В.С. Общая химическая технология и основы промышленной экологии: Учебник для вузов. / В.С. Бесков, В.С. Сафронов – М.: Химия – 1999. – 472 с.: ил.
91. Herskowitz, J. Town of Listowel artificial Marsh project, Project Report 128 RR. / J. Herskowitz, – Ontario Ministry of Environment, Toronto – 1986. – 276 p.
92. Василенко, А.А. Реконструкция и интенсификация сооружений водоснабжения и водоотведения: Учебное пособие / А.А. Василенко, П.А. Грабовский, Г.М. Ларкина, А.В. Полищук, В.И. Прогульный. – Киев – Одесса, КНУСА, ОГАСА – 2007. – 307с.
93. Щетинин, А.И. Особенности реконструкции городских очистных сооружений канализации в настоящий период / А.И. Щетинин // Вода и экология. – 2002. №2. – С. 22-28.
94. Васильев, Б.В. Технологии биологического удаления азота и фосфора на станциях аэрации / Б.В. Васильев, Б.Г. Мишуков и др. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001 – №5 – С.22-25
95. Wentzel, M.C. Process and modeling of nitrification denitrification biological excess phosphorus removal systems – a review / M.C. Wentzel, G.A. Ekama, G.v.R. Marais // Wat. Sci. Tech. – 1992 –vol.25, №6 – P.59-82
96. Rokade, K. Biodegradation of chlorpyrifos by *Pseudomonas Desmolyticum* 2112 / K. Rokade, G. Mali, // International journal of pharma and bio sciences – 2013. 4(2) – P. 609-616
97. Madigan, M.T Biology of Microorganisms / Madigan, M.T; Martinko J; Parker J. Brock – 10th Edition. – USA, Lippincott Williams & Wilkins .– 2004.–1104 p.
98. Бакулов, И. А..Эпизоотология с микробиологией : (Учеб. и практикум) / И. А. Бакулов, В. А. Ведерников, А. Л. Семенихин; Под ред. И. А. Бакулова. – 2. изд., стер. – Москва : Колос – 2000. – 480 с.
99. Günther, S. Dynamics of polyphosphate accumulating bacteria in waste water communities detected via DAPI and tetracycline labelling / S. Günther, M.

Trutnau, S. Kleinsteuber, G. Hause, T. Bley, I. Röske, H. Harms, S. Müller // Appl Environm Microbiol. – 2009. 75/7 – P. 2111-2121.

100. Нетрусов А.И. Практикум по микробиологии: Учебн.пособие для студ.высш.учеб.заведений / А.И. Нетрусов, М.А. Егорова, Л.М. Захарчук и др.; под ред. А.И. Нетрусова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 608 с.

101. ПНД Ф 14.1:2:4.112-97. Методика измерений массовой концентрации фосфат-ионов в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с молибдатом аммония. – Москва: Изд-во ФБУ «ФЦАО», 2011. – 18 с.

102. ГОСТ 31859-2012. Метод определения химического потребления кислорода. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 11 с.

103. ПНД Ф 14.1:2:3.1-95. Методика измерений массовой концентрации ионов аммония в природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера. – Москва: Изд-во ФБУ «ФЦАО», 2017. – 26 с.

104. ПНД Ф 14.1:2:43-95. Методика измерений массовой концентрации нитрит-ионов в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Грисса. – Москва: Изд-во ФБУ «ФЦАО», 2011. – 22 с.

105. ПНД Ф 14.1:2:4.4-95. . Методика измерений массовой концентрации нитрат-ионов в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с салициловой кислотой. – Москва: Изд-во ФБУ «ФЦАО», 2011. – 18 с.

106. Муравьев А.Г. Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами. 3-е изд., доп. и перераб. / А.Г. Муравьев. – СПб.: «Крисмас+» – 2004. – 248 с.

107. ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97 Методика выполнения измерений биохимического потребления кислорода после n-дней инкубации (БПК_{полн.}) в поверхностных пресных, подземных (грунтовых), питьевых, сточных и очищенных сточных водах. – Москва – 1997 г. – 18 с.

108. ПНД Ф 14.1:2.101-97. Методика выполнения измерений массовой концентрации растворенного кислорода в пробах природных и очищенных сточных вод йодометрическим. – Москва: Изд-во ФБУ «ФЦАО» – 1997. – 19 с.

109. Васильев, Д.А. Методы общей бактериологии / Д.А. Васильев, С.Н. Золотухин, А.А. Щербаков, Л.В. Карпунина – Ульяновск, ГСХА – 2008. – 223 с.
110. Weisburg, W. G. 16S ribosomal DNA amplification for phylogenetic study / W. G. Weisburg, et al. // *Journal of bacteriology*. – 1991. – Vol. 173,2. – P. 697-703.
111. Vasilyeva, L.V. *Asticcacaulis benevestitus* sp. nov., a psychrotolerant, dimorphic, prosthecate bacterium from tundra wetland soil / L.V. Vasilyeva M.V. Omelchenko, Y.Y. Berestovskaya, A.M. Lysenko, W.R. Abraham, S.N. Dedysh, G.A. Zavarzin // *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* – 2006 – V. 56. – P. 2083-2088.
112. Хабибуллина, А.Р. Об интенсификации процессов биологической дефосфатации сточных вод / А.Р. Хабибуллина, А.А. Хасанова, Т.В. Вдовина, А.С. Сироткин // VIII Международная научно-практическая конференция «Биотехнология: наука и практика». Ялта, – 2020. – С.522-524.
113. Маркевич, Р. М. Методическое руководство по контролю процесса биологической очистки городских сточных вод : учебно-методическое пособие / [Р. М. Маркевич и др.]. – Минск : БГТУ – 2009. – 161 с.
114. Хабибуллина, А.Р. Исследование процесса биологической дефосфатации модельных сред с использованием фосфатаккумуляирующих бактерий / А.Р. Хабибуллина, Т.В. Вдовина, Й.В. Кобелева, А.С. Сироткин // *Вестник технологического университета* – 2017. – Т.20, №19. – С.131-133.
115. Дорофеев, А.Г. Роль фосфат-аккумуляирующих бактерий в биологической очистке сточных вод от фосфора / А.Г. Дорофеев, Ю.А. Николаев, А.В. Марданов, Н.В. Пименов // *Прикладная биохимия и микробиология*. – 2020. – № 1. – С. 3-18.
116. Блажевич О. В. Культивирование клеток: Курс лекций / О. В. Блажевич – Мн.: БГУ – 2004. – 78 с.
117. Kulshreshtha N.M., *Advances in Biological Nitrogen Removal* / Kulshreshtha, N.M., Rampuria, A., Gupta, A.B. Arora, S., Kumar, A., Ogita, S., Yau, Y.Y. (eds). // *Innovations in Environmental Biotechnology Singapore: Springer*. – 2022. – P.265-281.

118. Бараз В. Р. Использование MS Excel для анализа статистических данных : учеб. пособие / В. Р. Бараз, В. Ф. Пегашкин; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Нижнетагил. техн. ин-т (филиал). – 2-е изд., перераб. и доп. – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ – 2014. – 181 с.

119. Макаричев Ю.А. Методы планирование эксперимента и обработки данных: учеб. пособие / Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников – Самара: Самар.гос. техн. ун-т – 2016. – 131 с.: ил.

120. Хабибуллина, А.Р. Оценка влияния факторов на эффективность удаления фосфатов активным илом / А.Р. Хабибуллина, Ф.В. Лядов, М.М. Самойленко, А.С. Джо-Мадугу, Т.В. Вдовина, А.С. Сироткин // XIII Международная конференция ученых биологов «Симбиоз-Россия 2022». Пермь, – 2023. – С.877-879.

121. Спирин Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженер-ного эксперимента: Учебное пособие / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, Л.А. Зайнуллин, А.Р. Бондин, А.А. Бурькин; Под общ. ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ООО «УИНЦ» – 2015. – 290 с.

122. Хабибуллина, А.Р. Анализ влияния факторов среды на биологическую дефосфатацию сточных вод / А.Р. Хабибуллина, Л.М. Сибиева, Й.В. Кобелева, Е.В. Перушкина, Т.В. Вдовина, А.С. Сироткин // Бутлеровские сообщения. – 2023. – Т.73, №3. – С.129-134.

123. Хабибуллина А.Р., Интенсификация процесса дефосфатации сточных вод с использованием зонной аэрации активного ила / А.Р. Хабибуллина, Т.В. Вдовина, А.С. Сироткин // Бутлеровские сообщения. – 2023. – Т.75. №8. – С. 66-72.

124. Хабибуллина, А.Р. Интенсификация процесса биологической дефосфатации сточных вод / А.Р. Хабибуллина, Т.В. Вдовина, А.С. Сироткин // XVIII Всероссийская конференция молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием «Пищевые технологии и биотехнологии». Казань, – 2023. – С.497-501.

125. Хабибуллина, А.Р. Мониторинг работы биологических очистных сооружений по удалению фосфат-ионов / А.Р. Хабибуллина, А.С. Джо-Мадугу, Д.Е. Смирнов, Т.В. Вдовина, А.С. Сироткин // Всероссийская научная интернет-конференция «Интеграция науки и высшего образования в области био- и органической химии и биотехнологии». Уфа, – 2022. – С. 77-78.

126. Гюнтер Л.И. Влияние технологических параметров работы аэротенков на формирование биоценозов и биохимические характеристики активного ила / Л.И. Гюнтер, М.А. Беляева, Л.Ф. Юдина, Н.В. Зенкова // Научные труды АКХ им. К.Д.Памфилова. – 1976. –Вып. 105. – С. 3-14.

127. Reimann, J. Chapter 7 Metal Enzymes in “Impossible” Microorganisms Catalyzing the Anaerobic Oxidation of Ammonium and Methane / J. Reimann, S.M. Mike; Jan T. Keltjens, // Sustaining Life on Planet Earth: Metalloenzymes Mastering Dioxygen and Other Chewy Gases (англ.) – Springer – 2015. – Vol. 15. – P. 257-313.

128. Лыжина Н.В. Экономическое обоснование курсовых и дипломных проектов: методические указания / сост.: Н.В. Лыжина, Ю.В. Пантелеева, М-во образ. и науки России, казан. нац. исслед.технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ – 2013. – 92 с.

129. Барышева Ю.Н. Бизнес-план для обоснования дипломных проектов и работ: Метод.указания для технико-экономических расчетов / сост.: Ю.Н. Барышева, Е.П. Логинова Казанский государственный технологический университет. – Казань – 2003. – 28 с.

130. Тарасова Н.П. Оценка воздействия промышленных предприятий на окружающую среду : учебное пособие / Н.П. тарасова, Б.В. Ермоленко, В.А. Зайцев, С.В. Макаров. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний – 2012. – 230 с. : ил.

131. СанПиН 2.1.4.1074-01 Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения – Москва – 2002 – 23 с.

132. Постановление Правительства РФ от 13.09.2016 N 913 (ред. от 24.01.2020) О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах. – Москва. – 2020 – 10 с.

**ТАТАРСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
АКЦИОНЕРЛЫК ЖӘМГЫЯТЕ
«ЗВКС»**

422541, ЗЕЛЕНОДОЛ ШӘҖӘРЕ, КУЛЛЕ УРАМ, 48
ТЕЛ. 8(84371) 4-38-27, ФАКС 4-23-92
E-mail: zelvodok@mail.ru



**РЕСПУБЛИКА ТАТАРСТАН
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ЗВКС»**

422541, г. ЗЕЛЕНОДОЛЬСК, ул. ОЗЕРНАЯ, 48
ТЕЛ. 8(84371) 4-38-27, ФАКС 4-23-92
E-mail: zelvodok@mail.ru

Отделение № 8610 Сбербанка России г. Казань р/с 40702810362480001018 к/с 30101810600000000603 БИК 049205603
ИНН 1648041104 КПП 164801001 Код ОКАТО 92420000000 Код ОКТМО 92628101001
Код ОКОГУ 4210014 Код ОКФС 16 Код ОКОПФ 12267

№ 23 «13» 01 2023 г.

«УТВЕРЖДАЮ»



Генеральный директор

АО «ЗВКС»

Р.Р. Залялов

2023 г.

Акт выполненных работ

Результаты, полученные в ходе диссертационной работы Хабибуллиной Аида Рамилевны по изучению процесса биологической очистки сточных вод от фосфат-ионов, являются практически важными для мониторинга процессов удаления биогенных элементов на станциях биологической очистки АО «ЗВКС». В работе исследованы эффективности удаления фосфат-ионов, органических веществ на станциях биологической очистки (БОС) в г. Зеленодольск и п.г.т. Васильево. В качестве факторов, влияющих на процесс биологической дефосфатации, были определены концентрации ионов аммония, нитрит- и нитрат-ионов, количество растворенного кислорода, уровень pH и температура сточных вод. Отбор проб осуществлялся с 11 октября 2021 до 22 октября 2021.

На основании конструктивных данных и объемах поступающих сточных вод было рассчитано время пребывания стоков на станции очистки в целом (в г. Зеленодольск – 8 часов, в п.г.т. Васильево – 7,5 часов) и на каждом узле согласно технологической схеме. Результаты, полученные в ходе научно-исследовательской работы, представлены в таблицах 1,2.

Таблица 1 – Показатели сточной воды в процессе очистки на станции биологической очистки в г. Зеленодольск

Показатель	Температура, °С	Кислотность, рН	Концентрация растворенного кислорода, мг/дм ³	Концентрация фосфат-ионов, мг/дм ³	Концентрация органических веществ, мг/дм ³	Концентрация ионов аммония, мг/дм ³	Концентрация нитрит-ионов, мг/дм ³	Концентрация нитрат-ионов, мг/дм ³
Место отбора пробы								
Сточная вода	20,8	7,6	4,02	16,8±1,0	202,7±48,6	72,0±15,1	0,9±0,1	0,10±0,01
Первичный отстойник	20,3	7,2	1,73	17,1±1,0	221,1±53,1	62,5±13,1	0,8±0,1	0,50±0,03
Место смешения сточной воды и активного ила	20,0	7,4	3,30	11,3±0,7	165,8±39,8	28,5±5,9	0,6±0,1	8,3±0,6
Начало аэротенка №1	20,0	7,1	4,20	10,3±0,6	133,6±32,1	27,3±5,7	0,20±0,02	5,3±0,4
Середина аэротенка №1	20,1	7,1	4,17	2,3±0,1	124,4±29,9	17,9±3,8	0,5±0,1	6,4±0,5
Конец аэротенка №1	19,9	7,5	4,30	0,40±0,03	119,7±28,7	12,6±2,7	0,7±0,1	16,7±1,2
Вторичный отстойник	20,0	7,5	2,40	0,20±0,01	87,5±21,0	12,5±2,6	1,4±0,2	18,4±1,3

Таблица 2 – Показатели сточной воды в процессе очистки на станции биологической очистки в п. г. т. Васильево

Показатель	Температура, °С	Кислотность, рН	Концентрация растворенного кислорода, мг/дм ³	Концентрация фосфат-ионов, мг/дм ³	Концентрация органических веществ, мг/дм ³	Концентрация ионов аммония, мг/дм ³	Концентрация нитрит-ионов, мг/дм ³	Концентрация нитрат-ионов, мг/дм ³
Место отбора пробы								
Сточная вода	17,9	7,7	2,7	19,2±1,2	61,1±14,7	62,5±13,1	3,0±0,2	0,7±0,1
Место смешения сточной воды и активного ила	18,5	7,5	3,2	16,6±0,1	69,9±16,8	8,5±1,2	2,8±0,2	1,7±0,2
Нитрифициатор	18,4	7,4	1,3	70,7±4,2	47,9±11,5	14,5±3,0	3,8±0,3	0,10±0,01
Начало аэротенка №2	18,2	7,2	1,3	57,3±3,4	3,6±0,8	4,0±0,8	2,1±0,1	0,10±0,01
Середина аэротенка №2	18,4	7,1	3,3	11,3±0,7	3,6±0,8	0,6±0,1	1,1±0,1	0,9±0,1
Конец аэротенка №2	18,3	7,1	2,8	11,1±0,7	16,9±4,1	1,4±0,3	0,10±0,01	14,8±1,6
Вторичный отстойник	17,9	7,4	1,2	11,3±0,7	21,3±5,1	0,10±0,02	0,40±0,04	14,0±1,5

Согласно результатам, приведенным в таблицах 1, 2, эффективность дефосфатации в узле биологической очистки составляет около 99% и 41 % для станций г. Зеленодольск и п.г.т. Васильево, соответственно.

На основании результатов представленных исследований выработаны рекомендации об отборе проб для мониторинга работы станций очистки с соблюдением временного параметра пребывания сточных вод. Это позволит контролировать эффективность очистки по всем необходимым критериям.

Научный руководитель НИР:

д.т.н., профессор
А.С. Сироткин



Согласовано:

главный технолог
АО «ЗВКС», к.т.н
Л. М. Сибиева



Ответственный исполнитель:

зав. лабораторией каф. ПБТ ФГБОУ ВО
«КНИТУ», аспирант
А.Р. Хабибуллина





ООО НПК «БИОТЕХИНЖИНИРИНГ» Юридический/почтовый адрес:
420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 34В, пом. 5
ИНН/КПП: 1660239220/166001001 ОГРН: 1151690020404
тел.: +7 (967) 469-82-02 эл. почта: biotex-ing@mail.ru

Исх. № 19

От «13» октября 2022г

Утверждаю

Генеральный директор

ООО «НПК «Биотехинжиниринг»

 Хабибуллин Д.И.

«13» октября 2022 г.



АКТ

опытно-промышленных испытаний

Результаты, полученные в ходе научно-исследовательской работы (НИР) Хабибуллиной Аида Рамилевны по изучению процесса биологической очистки сточных вод от фосфат-ионов, являются практически важными для мониторинга процессов удаления биогенных элементов на станции биологической очистки БТИ-БОС с. Кошаково Пестречинского района.

В рамках НИР оценена эффективность удаления фосфат-ионов, органических веществ и соединений азота на станциях биологической очистки с. Кошаково. Опытно-промышленные испытания проводились с 1 июня 2022 по 31 июля 2022 года.

Технологическая схема узла биологической очистки с активным илом представлена денитрификтором, аэротенками и вторичным отстойником. Аэрация в указанных сооружениях осуществляется за счет перемешивания или принудительной аэрации, что позволяет создать условия чередования режимов по содержанию растворенного кислорода.

Мониторинг работы очистных сооружений показал, что средняя эффективность удаления органических веществ по ХПК составляет 50%, ионов аммония – 12%, фосфат-ионов – 44%.

В работе экспериментально исследована дефосфатирующая способность активного ила в условиях постоянной и зонной (чередование кислородных режимов) аэрации (рис.1,2).

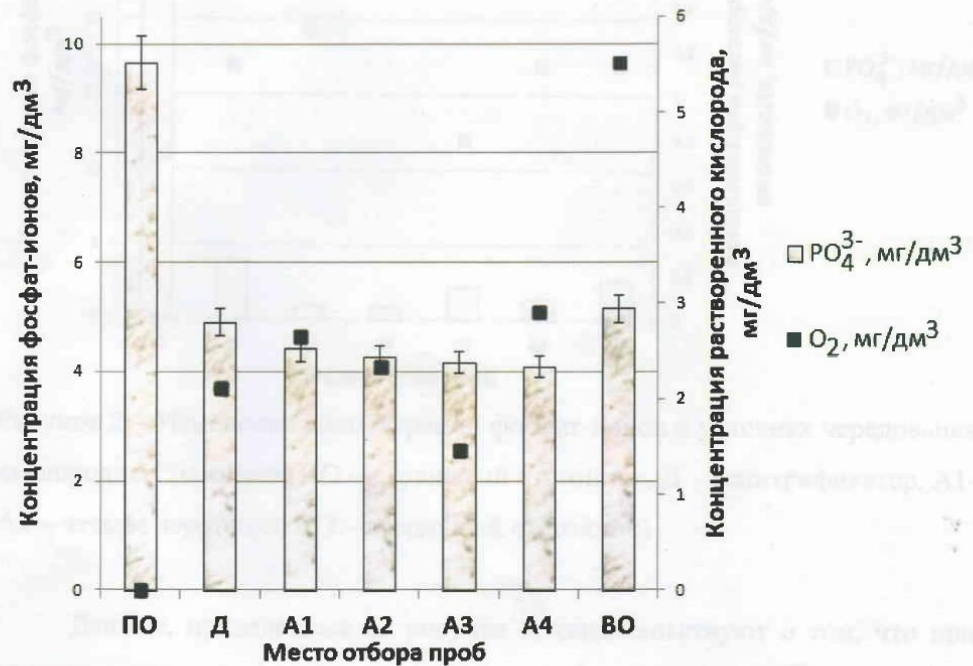


Рисунок 1 – Изменение концентрации фосфат-ионов в условиях постоянной аэрации (ПО – первичный отстойник, Д – денитрификатор, А1-А4 – четыре аэротенка, ВО – вторичный отстойник)

Результаты, представленные на рисунке 1, свидетельствуют о том, что в условиях постоянной аэрации и концентрации кислорода около 2 мг/дм³, концентрация фосфат-ионов снижается на 49%. При поддержании уровня кислорода в среде на уровне 1,5-2,5 мг/дм³ происходит потребление фосфат-ионов и снижение их концентрации до 4 мг/дм³. Максимальная эффективность биологической дефосфатации в условиях постоянной аэрации за период наблюдения составила 48%.

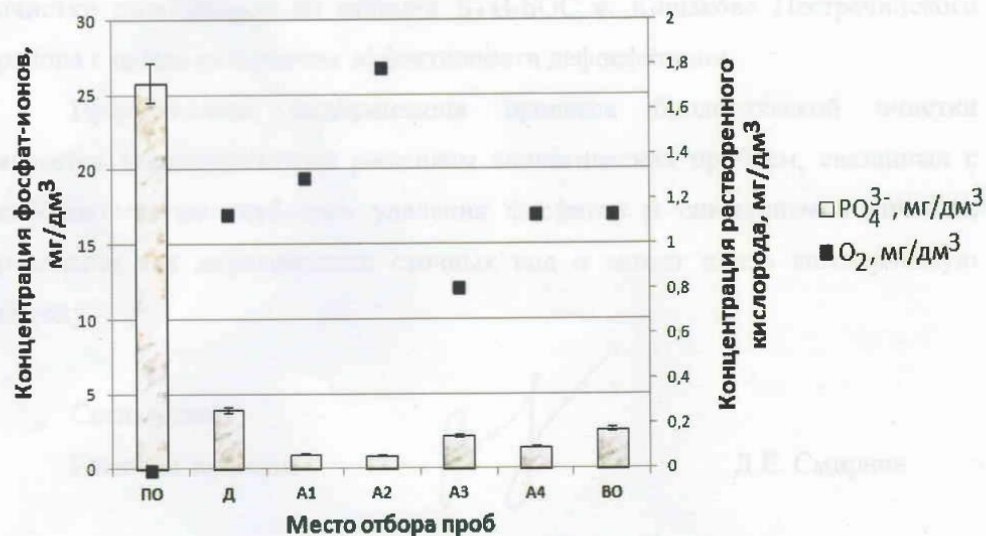


Рисунок 2 – Изменение концентрации фосфат-ионов в условиях чередования кислородных режимов (ПО – первичный отстойник, Д – денитрификатор, А1-А4 – четыре аэротенка, ВО – вторичный отстойник)

Данные, приведенные на рисунке 2, свидетельствуют о том, что при концентрации кислорода около 1,1-1,8 мг/дм³ в денитрификаторе и первых двух аэротенках, концентрация фосфат-ионов снижается на 96%. Дальнейшее снижение концентрации кислорода до 0,8 мг/дм³ приводит к высвобождению 1,3 мг/дм³ фосфат-ионов в надилловую жидкость. При последующем увеличении содержания кислорода в среде до 1,1 мг/дм³ происходит интенсивное потребление фосфат-ионов и снижение их концентрации до 2,6 мг/дм³. Максимальная эффективность биологической очистки в условиях чередования кислородных режимов за период наблюдения составила 89%.

В работе экспериментально показано, что чередование кислородных режимов в узле биологической очистки значительно увеличивает эффективность биологической дефосфатации в сравнении с протеканием процесса в условиях постоянной аэрации.

Таким образом, полученные результаты послужили основанием для внедрения исследованных режимов аэрации в процессе биологической

очистки сточных вод на станции БТИ-БОС с. Кошаково Пестречинского района с целью повышения эффективности дефосфатации.

Предложенная модернизация процесса биологической очистки является технологическим решением экологических проблем, связанных с необходимостью глубокого удаления фосфатов и снижением количества реагентов для дефосфатации сточных вод и может иметь коммерческую выгоду.

Согласовано:

Главный технолог

Д.Е. Смирнов

Научный консультант

д.т.н., профессор

А.С. Сироткин

Научный руководитель

к.т.н.

Т.В. Вдовина

Ответственный исполнитель

зав. лабораторией, аспирант

А.Р.Хабибуллина