

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ УКРАИНЫ

С.А. Горносталь, Е.А. Петухова, Ю.В. Уваров

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ
ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД**

Монография

Харьков 2015

Печатается по решению
ученого совета НУГЗ Украины
Протокол от 16.06.15 № 13

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор В. В.Березуцкий;
доктор технических наук, профессор М. І. Адаменко

УДК 628.35

Повышение эффективности работы сооружений биологической очистки городских сточных вод: монография / С.А. Горносталь, Е.А. Петухова, Ю.В.Уваров - Х: НУГЗУ, 2015. – 102 с.

В монографии изложены научные основы повышения эффективности работы сооружений биологической очистки городских сточных вод путем обоснования и разработки метода выбора технологического режима работы аэротенка. Она предназначена для инженерно–технических работников, занимающихся проектированием, строительством и эксплуатацией сооружений очистки сточных вод. Монография рекомендуется для преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений направлений «Гражданская защита», «Экология».

ISBN

© С. А. Горносталь, Е.А. Петухова,
Ю.В. Уваров, 2015
© НУГЗУ, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Раздел 1. Существующее состояние вопроса по предотвращению загрязнения водных объектов	7
1.1 Состояние защиты водных объектов от загрязнения недостаточно очищенными сточными водами	7
1.2 Основные сооружения биологической очистки сточных вод	10
1.3 Анализ существующих математических моделей биологической очистки сточных вод	12
1.4 Выбор направления исследования.....	20
Раздел 2. Исследование процесса биологической очистки сточных вод в системе «Аэротенк – вторичный отстойник» (на примере сооружений комплекса биологической очистки «Диканевский» г.Харьков)	22
2.1 Общая характеристика сооружений комплекса биологической очистки «Диканевский» г.Харьков.....	22
2.2 Исследование показателей возвратного ила, подаваемого в регенератор аэротенка.....	24
2.3 Исследование процесса биологической очистки сточных вод в системе «аэротенк – вторичный отстойник»	26
2.3.1 Процессы, происходящие в первом коридоре аэротенка.....	27
2.3.2 Описание процессов, происходящих во втором коридоре аэротенка	29
2.3.3 Описание процессов, происходящих в третьем и четвертом коридорах аэротенка	31
2.3.4 Исследования процесса очистки во вторичном отстойнике.....	33
Выводы к разделу 2	34
Раздел 3. Математическое моделирование процесса биологической очистки сточных вод	36
3.1 Математическое описание изменения концентраций загрязнений, составляющих активного ила и продуктов автолиза в аэротенке с использованием константы полунасыщения	36
3.2 Усовершенствование математического описания изменения концентраций загрязнений, составляющих активного ила и продуктов автолиза в системе «аэротенк – вторичный отстойник».....	41
3.3 Анализ процессов, происходящих в аэротенке промежуточного типа в четырех фазах биологической очистки.....	48
3.4 Анализ результатов численных расчетов концентраций загрязнений и составляющих активного ила, полученных в результате использования разных моделей	51
Выводы к разделу 3	55

Раздел 4. Экспериментально–расчетные исследования процесса биологической очистки сточных вод	56
4.1 Описание методики проведения эксперимента по исследованию процесса биологической очистки сточных вод	56
4.2 Экспериментально–расчетное исследование процесса биологической очистки сточных вод в системе «аэротенк – вторичный отстойник»	59
4.2.1 Исследование процесса биологической очистки сточных вод в первой фазе очистки	59
4.2.2 Исследование процесса биологической очистки сточных вод во втором–четвертом коридорах аэротенка и вторичном отстойнике	66
4.3 Анализ адекватности математической модели процесса биологической очистки в аэротенке экспериментальным исследованиям.	73
Выводы к разделу 4.....	78
Раздел 5. Разработка технического решения по повышению эффективности работы сооружений биологической очистки городских сточных вод	79
5.1 Разработка метода выбора технологического режима работы аэротенка промежуточного типа с регенератором при очистке городских сточных вод.....	79
5.2 Практическая реализация метода выбора технологического режима работы аэротенка.....	86
Выводы к разделу 5.....	90
Общие выводы	91
Список использованных источников	93

ВВЕДЕНИЕ

Производственная и хозяйственная деятельность человека влечет за собой интенсивное загрязнение гидросферы и происходит это, прежде всего, в связи с выпуском недостаточно очищенных бытовых и промышленных стоков в водоемы. Бытовые и производственные сточные воды содержат значительные количества органических веществ, способных быстро загнить и служить питательной средой для различных, в том числе и патогенных, микроорганизмов; некоторые производственные сточные воды могут содержать токсические примеси. Попадание сточных вод в водоемы без очистки или с недостаточной степенью очистки представляет серьезную угрозу для населения, приводит к ухудшению экологической ситуации и возникновению опасности для жизнедеятельности, здоровья людей и животных.

Низкое качество очистки сточных вод от органических загрязнений приводит к ухудшению экологической ситуации окружающей среды. Поэтому изучение особенностей процесса биологической очистки сточных вод в системе «аэротенк – вторичный отстойник», влияния различных факторов на качество очистки сточных вод, обоснование и разработка метода выбора технологического режима работы аэротенка промежуточного типа при очистке городских сточных вод от органических загрязнений для повышения эффективности биологической очистки сточных вод в аэротенке является задачей актуальной и своевременной.

Целью исследования является повышение эффективности работы сооружений биологической очистки городских сточных вод путем научного обоснования и разработки метода выбора технологического режима работы аэротенка.

Для достижения поставленной цели решались такие задачи:

- анализ существующих методов и технологических схем очистки сточных вод, а также методов интенсификации работы очистных сооружений;
- изучение и обобщение механизма удаления загрязняющих веществ в процессе биологической очистки городских сточных вод;
- разработка более совершенной математической модели процесса биологической очистки в системе сооружений «аэротенк – вторичный отстойник» с учетом конструктивных особенностей сооружений;
- реализация предложенной модели процесса биологической очистки городских сточных вод численными методами;
- получение эмпирической зависимости дозы активного ила на выходе из регенератора аэротенка от дозы ила, подаваемого в регенератор, и расхода активного ила; получение эмпирической зависимости концентрации загрязнений в очищенной воде на выходе из сооружений биологической очистки от дозы ила, от концентрации загрязнений в поступающих на очистку сточных вод;
- оценка адекватности полученной модели путем сравнения результатов расчета по модели с результатами экспериментальных измерений;

– разработка и обоснование метода выбора технологического режима работы аэротенка при очистке городских сточных вод для повышения эффективности работы сооружений биологической очистки.

Исследования выполнялись в лабораторных и производственных условиях на канализационных очистных сооружениях г. Харькова. Лабораторные исследования выполнены с использованием методов гидрохимического анализа жидких сред, химические и физико-химические методы – при исследовании качества сточных вод. Для обработки экспериментальных данных использовались статистические методы, математическое моделирование и методы теории планирования эксперимента.

Разработанные в результате проведенного научно-теоретического анализа и экспериментальных исследований математическая модель процесса биологической очистки и эмпирические зависимости в совокупности с принципами их реализации являются научно-методической базой для создания метода выбора технологического режима работы аэротенка при очистке городских сточных вод и рекомендаций по его применению. Предложенный метод позволяет путем оперативного регулирования соотношения «сточная жидкость - активный ил» получать на выходе из сооружений биологической очистки концентрации загрязняющих веществ не выше предельно допустимых значений и повысить эффективность процесса биологической очистки.

Разработанный метод можно использовать как при эксплуатации и реконструкции действующих сооружений, так и при проектировании новых аэротенков. Предложенные рекомендации позволяют без проведения дополнительных экспериментов определить необходимые технологические и конструктивные характеристики надежной работы аэротенка.

Авторы благодарны доктору технических наук, профессору Сознику А.П., коллективу кафедры физико-математических дисциплин Национального университета гражданской защиты Украины, коллективу кафедры водоснабжения, канализации и гидравлики Харьковского национального университета строительства и архитектуры, коллективу комплекса биологической очистки «Диканевский», всем специалистам, оказавшим помощь в процессе выполнения исследований.

РАЗДЕЛ 1

СУЩЕСТВУЮЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

1.1 Состояние защиты водных объектов от загрязнения недостаточно очищенными сточными водами

В настоящее время важной научно-технической задачей является защита природной среды от загрязнения ее отходами промышленных производств и сточными водами населенных пунктов и обеспечение её экологической безопасности. Попадание органических и минеральных загрязнений в водные объекты происходит при сбросе коммунальных и промышленных сточных вод, образующихся в результате технологических процессов производства, переработки продукции и в процессе жизнедеятельности людей [1-6].

Эффективность очистки сточных вод от органических загрязнений и взвешенных веществ, а значит и экологическая безопасность водоемов в значительной степени зависит от того, как организованы массообменные и гидравлические процессы в аэрационном сооружении (аэротенке), которое является основным функциональным звеном технологической схемы аэробной биологической очистки. Основными факторами, влияющими на выбор оптимального режима работы аэротенков, является гидродинамическая схема течения потока, эффективность насыщения жидкой среды кислородом воздуха, подаваемого системами аэрации, качество и количество активного ила, подаваемого в аэротенк.

Качество очистки сточных вод на сооружениях биологической очистки определяет качество воды в водоемах, которые используются для культурно-бытового и рыбохозяйственного назначения [5-9]. Несмотря на достаточно жесткие требования [10-15], которые предъявляются к качеству сточных вод, сбрасываемых в водоем, а также на значительное сокращение объемов промышленного производства, за прошедшее десятилетие не произошло заметного улучшения качества воды в природных водных объектах. В районах сброса сточных вод продолжается интенсивное загрязнение и накопление промышленных загрязнений, потенциально опасных веществ. Нарушение в режиме работы сооружений биологической очистки аэротенк — вторичный отстойник приводят к попаданию в водоем загрязнений в концентрациях, которые превышают допустимые [1-4, 15]. Таким образом происходит ухудшение экологической обстановки в районах сбросов сточных вод. Качество воды в большинстве водоемов Украины по состоянию химического и бактериального загрязнения классифицируется как загрязненная и грязная (IV – V класс качества). Острейшее экологическое состояние наблюдается в бассейнах рек Днепра, Северского Донца, реках Приазовья, отдельных притоках Днестра, Западного Буга, где качество воды классифицируется как очень грязная (VI класс). Для экосистем большинства водных объектов Украины свойственные элементы экологического и метаболического регресса [6].

К основным загрязняющим веществам, попадающим в водоемы со сбрасываемыми после очистки водами, относятся органические вещества, нефтепродукты, фенолы, азот аммонийный и нитратный, тяжелые металлы и тому подобное. Для подавляющего большинства предприятий промышленности и коммунального хозяйства сброс загрязняющих веществ существенно превышает установленный уровень предельно допустимого сброса. Это приводит к загрязнению водных объектов, нарушению норм качества воды.

Основными причинами загрязнения поверхностных вод Украины являются:

- сброс неочищенных и не достаточно очищенных коммунально-бытовых и промышленных сточных вод непосредственно в водные объекты и через систему городской канализации;
- поступление в водные объекты загрязняющих веществ в процессе поверхностного стока воды с застроенных территорий и сельхозугодий;
- эрозия почв на водозаборной площади.

Традиционные технологии биологической очистки сточных вод имеют ряд недостатков, и для крупных очистных сооружений донныне важным практическим заданием остается вопрос соблюдения норматива предельно допустимого сброса, значение которого все время ужесточается [10, 12, 14]. Очистка сточных вод часто проводится в недостаточной степени, что приводит к попаданию в водоем большого количества загрязняющих веществ [1, 3, 4, 17, 18], приводящих к ухудшению экологической ситуации в регионах.

Очистные сооружения во всех регионах Украины имеют значительный физический износ и требуют существенного обновления, усовершенствования технологического процесса, замены оборудования [3, 15, 16]. Поэтому в настоящее время актуальной является необходимость усовершенствования существующих и создания новых, экологически безопасных технологических процессов и оборудования, которые обеспечат рациональное использование водных ресурсов и соблюдение нормативов предельно допустимых сбросов, для минимизации воздействия техногенного загрязнения на окружающую среду и человека.

Согласно перечню, представленному министерством экологии и природных ресурсов Украины, из ста объектов, являющихся источниками наибольшего загрязнения окружающей среды в Украине, практически в каждой области такими источниками являются предприятия жилищно-коммунального хозяйства [3]. По данным министерства охраны окружающей природной среды Украины [1-3] для регионов Украины характерны разные значения превышения нормативов сбросов по различным показателям (табл.1.1). Таким образом, в среднем, по показателям, представленным в табл. 1.1, превышение нормативов сброса в сбрасываемых в водоемы водах по регионам составило 41 %.

Таблица 1.1 – Превышение норматива предельно-допустимого сброса по регионам Украины

№	Регион Украины	Превышение норматива сброса, %, по содержанию:					
		хлориды	сульфаты	БПК ₅	ХПК	азот нитритный	фосфаты
1	Западный регион	25	17	54	35	14	39
2	Центральный регион	28	31	23	11	23	20
3	Северный регион	34	9	58	72	55	56
4	Южный регион	34	34	50	64	12	61
5	Восточный регион	78	100	50	33	48	42

Большинство случаев превышения нормативов сброса сточных вод (58 %) отмечен в восточном регионе. Больше всего случаев превышения нормативов сброса зафиксировано по содержанию органических веществ, то есть по БПК₅ (биохимическая потребность в кислороде); средний процент превышения нормативов по всем регионам по этому показателю составил 41 %.

По данным министерства экологии и природных ресурсов Украины [4] ежегодно в поверхностные водные объекты Харьковской области попадают оборотные воды с содержанием загрязняющих веществ, превышающим предельно допустимые концентрации.

Данные об использовании воды разными потребителями в Харьковской области приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Динамика использования воды в Харьковской области

Показатель	Единица измерения	2007	2008	2009	2010
Забрано воды из природных источников, всего, в том числе:	млн. м ³	348,5	362,7	331	337,4
поверхностной	млн. м ³	293,8	309,7	284	291,4
подземной	млн. м ³	54,7	53,0	47	46,0
Забрано воды из природных источников в расчете на одного человека	м ³	124	113	119	122
Использовано свежей воды всего, в том числе на нужды	млн. м ³	294,6	316,9	283	286,8
хозяйственно-питьевые	млн. м ³	151,6	150,1	143	143,2
производственные	млн. м ³	104,5	127,3	101	104,2
сельскохозяйственные	млн. м ³	6,1	5,3	5	4,7
орошения	млн. м ³	1,5	2,5	2	2,7

Продолжение таблицы 1.2

Использовано свежей воды в расчете на одного человека	м ³	105	114	102	104
Сброшено оборотных вод, всего:	млн. м ³	316,3	323,3	300,0	303,1
в том числе:					
в подземные горизонты	млн. м ³	0,028	0,0	0,0	0,0
в поверхностные водные объекты	млн. м ³	308,1	316,1	294	297,6
Сброшено оборотных вод в поверхностные водные объекты, всего:	млн. м ³	308,1	316,1	294	297,6
из них нормативно очищенных, всего:	млн. м ³	242,5	233,5	224	223,9
– на сооружениях физико-механической очистки	млн. м ³	-		0,1	-
– на сооружениях механической очистки	млн. м ³	1,659	2,0	1,9	1,9
нормативно (условно) чистых без очистки	млн. м ³	46,5	66,5	56,0	59,0
загрязненных, всего	млн. м ³	22,176	16,1	14,0	14,6
в том числе:					
недостаточно очищенных	млн. м ³	12,176	8,3	7	7,1
без очистки	млн. м ³	10,0	7,8	6,7	7,5
Сброшено оборотных вод в поверхностные водные объекты в расчете на одного человека	м ³	111	114	106	108

Анализ данных таблицы 1.2 позволяет сделать вывод о том, что, несмотря на незначительное снижение количества оборотных вод, сбрасываемых в различные водные объекты, процент недостаточно очищенных оборотных вод и вод без очистки к общему количеству сбрасываемых вод остается достаточно высоким.

Таким образом, превышение концентрации загрязнений в сбрасываемых в водоем сточных водах практически во всех областях Украины, в Харьковской области в частности, способствует возникновению реальной угрозы ухудшения экологической ситуации, связанной с попаданием недостаточно очищенных и неочищенных сточных вод в водные объекты и задача повышения эффективности очистки сточных вод остается актуальной.

1.2 Основные сооружения биологической очистки сточных вод

Одними из самых распространенных и трудно извлекаемых загрязнений городских сточных вод являются мелкодисперсные (коллоидные) и растворенные органические загрязнения. Физико-химические методы их извлечения и деструкции такие, как адсорбция, реагентная обработка, использование

окислителей, экстракция и другие, достаточно дороги и малоприменимы при больших расходах сточных вод. Поэтому самым результативным на сегодняшний момент является метод биологической очистки, так как именно при его использовании обеспечивается деструкция сложных органических загрязнений, осуществляемая безреагентным путем в обычных физико-химических условиях и с минимальными затратами энергии [19-21]. Метод биологической очистки экологически безопасен, так как углерод органических соединений в результате деструкции окисляется до углекислоты и воды, азот – до нитритов и нитратов, а живые клетки аэробных бактерий не только безвредны, но могут быть и полезны окружающей среде [22, 23].

Биологическая очистка сточных вод может осуществляться в сооружениях с прикрепленной микрофлорой (биофильтры), со свободноплавающей микрофлорой (аэротенки) или со смешанной микрофлорой (аэротенки с насадкой, биотенки). Благодаря своей универсальности и эффективности в работе наибольшее распространение получили аэрационные сооружения типа аэротенков [24, 25]. Однако в последние годы специалисты приходят к выводу, что классические модификации процесса очистки в аэротенках (аэротенки–смесители, аэротенки–вытеснители, аэротенки с отдельной регенерацией активного ила, двухступенчатые аэротенки) хотя и позволяют достигать степень очистки не превышающую допустимых концентраций, но технические возможности их практически исчерпаны. Дальнейшее развитие может идти по пути совершенствования технологического процесса в существующих сооружениях или радикального изменения их конструкции [26-28].

Традиционные коридорные аэротенки при всех их положительных качествах обладают рядом существенных недостатков: неравномерной по длине сооружения нагрузкой на активный ил, ухудшающей его технологические свойства; дефицитом растворенного кислорода в начальных наиболее нагруженных зонах сооружения, тормозящим процессы окисления загрязнений; избытком растворенного кислорода в конечных зонах, неоправданно увеличивающим его безвозвратные потери со сбрасываемой из очистных сооружений сточной водой. При проектировании аэротенков в настоящее время не учитываются количественные и качественные колебания притока, а в расчет принимаются лишь максимальные параметры исходной сточной воды. В то же время, например, максимальная БПК поступающих городских сточных вод больше минимальной в 1,5–3,0 раза, максимальный расход больше минимального в 1,6–2,2 раза, причем экстремальные значения концентраций загрязнений и расхода практически совпадают по времени. Жесткие условия эксплуатации при несовершенстве технологического режима приводят к систематическим нарушениям условий работы аэротенков [29-30].

Основными направлениями развития управляемых процессов биохимической очистки сточных вод, получившими распространение в настоящее время, являются:

–управление качеством поступающих сред: усреднение расхода сточных вод, усреднение концентрации загрязнений, разбавление очищенной водой [31, 32];

–управление системой подачи поступающей среды: рассредоточенный впуск сточной воды в аэротенк, рассредоточенный впуск активного ила в аэротенк, циклические (контактные) аэротенки [33-35];

–управление технологическим процессом очистки: управление гидродинамической структурой потока в аэротенке, управление кислородным режимом в аэротенке, управление концентрацией активного ила в аэротенке [36 - 39].

Анализ передового отечественного и зарубежного опыта показывает, что из всех возможных путей создания технологически управляемых процессов биохимической очистки реализована лишь меньшая их часть, известные же попытки управления работой аэротенков связаны с регулированием отдельных элементов технологического процесса и, как правило, отличаются неудовлетворительным инженерным исполнением.

Таким образом, актуальной в современных условиях является разработка технологических моделей управления системой подачи поступающей среды для обеспечения максимальной эффективности аэробной биологической очистки сточных вод.

1.3 Анализ существующих математических моделей биологической очистки сточных вод

Для расчета параметров очистных сооружений, и, прежде всего их оптимального объема, используется математическое моделирование [40-71]. Основополагающим математическим аппаратом разрабатываемых моделей являются дифференциальные уравнения, предложенные в [40]. Главным моментом рассмотренных моделей является тот факт, что всю цепочку взаимопревращений от входа в аэротенк сточных вод и активного ила и до выхода из вторичного отстойника описывают одной системой уравнений для различных величин. В качестве таких величин обычно рассматривают концентрацию загрязнений, активного ила (с разделением или без разделения на отдельные составляющие), кислорода и продуктов автолиза [52]. Несмотря на значительные достижения в изучении динамики и развития микробных популяций, многие вопросы все еще остаются не решенными, и при расчете основных параметров очистных систем до сих пор руководствуются эмпирическими соображениями. Чтобы рассчитать систему аэротенк – вторичный отстойник, необходимо выбрать уравнения, описывающие кинетику процессов жизнедеятельности микроорганизмов и потребления субстрата.

Процесс очистки осуществляется в аэротенках различного типа: идеального вытеснения, идеального смешивания и промежуточного типа [48, 68]. Работа аэротенков основана на способности микроорганизмов извлекать органические загрязнения из сточных вод в процессе своей жизнедеятельности.

Большое разнообразие микроорганизмов в активном иле, которое меняется с течением времени, и существование различных типов их взаимодействия между собой [18, 28, 48, 70-73] обуславливает многофакторность и существенную сложность описания процессов биологической очистки в аэротенках. С этой целью используют математическое моделирование явлений взаимодействия микроорганизмов активного ила между собой и с загрязнениями, поступающими со сточными водами. Основным аппаратом всех детерминированных моделей являются системы дифференциальных уравнений первого порядка различной степени сложности. Основные идеи таких уравнений были предложены в [57-60] для описания биологических популяций и обобщены для системы «жертва – хищник» А.Н. Колмогоровым. Существенным моментом таких теорий является наличие трофической функции, которая описывает функциональный отклик хищника на жертву. При использовании различных модельных представлений для трофической функции возникает проблема устойчивости биологических сообществ [58-64]. Такой теоретический подход нашел широкое применение для моделирования процессов биологической очистки сточных вод активным илом. Созданные на этом пути модели в той или иной степени удовлетворительно описывают явления очистки в идеальных аэротенках–смесителях или вытеснителях.

Простейшая система уравнений, описывающая рост биомассы ила на ограниченном количестве субстрата (лимитирование по субстрату), – модель Моно [40]:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= \frac{\mu \cdot XL}{K_L + L}, \\ \frac{dL}{dt} &= -\frac{\mu \cdot XL}{Y(K_L + L)}, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где X – концентрация активного ила;

L – концентрация загрязнений (субстрата);

μ – максимальная удельная скорость роста биомассы активного ила в результате потребления субстрата;

K_L – константа полунасыщения, равная концентрации субстрата, при которой скорость процесса равна $\mu/2$;

$Y = \left| \frac{dX}{dL} \right|$ – коэффициент трансформации субстрата в биомассу.

Принципиальным элементом модели Моно является зависимость удельной скорости роста ила от концентрации лимитирующего субстрата, где константа полунасыщения равна концентрации субстрата, при которой скорость роста ила равна половине максимальной. Из исследований [18, 22, 56] известно, что в условиях лимитирования по субстрату скорость роста биомассы активного ила растет пропорционально концентрации субстрата, а при из-

бытке субстрата выходит на постоянную величину, определяемую генетическими возможностями популяции. В течение некоторого времени численность популяции растет экспоненциально, пока скорость роста не начинает лимитироваться какими-либо другими факторами. Зависимость скорости роста μ от субстрата записывается в виде:

$$\mu(L) = \frac{\mu_0 \cdot L}{K_L + L} \quad (1.2)$$

Модель (1.1), (1.2) была предложена для описания развития монокультуры и не отражает сложного видового состава биомассы активного ила, однако решение системы уравнений (1.1)–(1.2) достаточно хорошо на качественном уровне совпадает с экспериментальной кривой роста биомассы активного ила. Численное решение системы дифференциальных уравнений (1.1) приведено на рис.1.1, параметры для расчета были взяты из работ [44, 52, 56, 57]. Анализируя результаты вычислений (рис. 1.1), видим, что решение этой системы совпадает с экспериментальной кривой роста биомассы активного ила для очень небольшой начальной концентрации активного ила, в пределах 0,008 до 0,02 г/л.

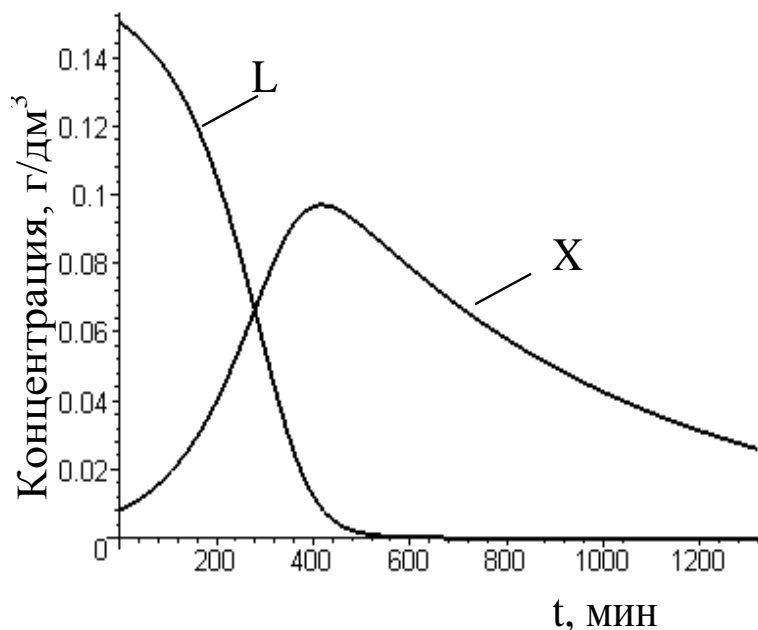


Рисунок1.1 – Изменение концентраций субстрата L и активного ила X при начальной концентрации активного ила $0,008 \text{ г/дм}^3$.

При начальной дозе ила около $a_{\text{вх}} = 6,0 \text{ г/дм}^3$ и концентрации загрязнений по БПК₅ в поступающих на очистку сточных водах $L_{\text{вх}} = 0,15 \text{ г/дм}^3$ концентрация субстрата практически мгновенно уменьшается до нуля (рис. 1.2–а).

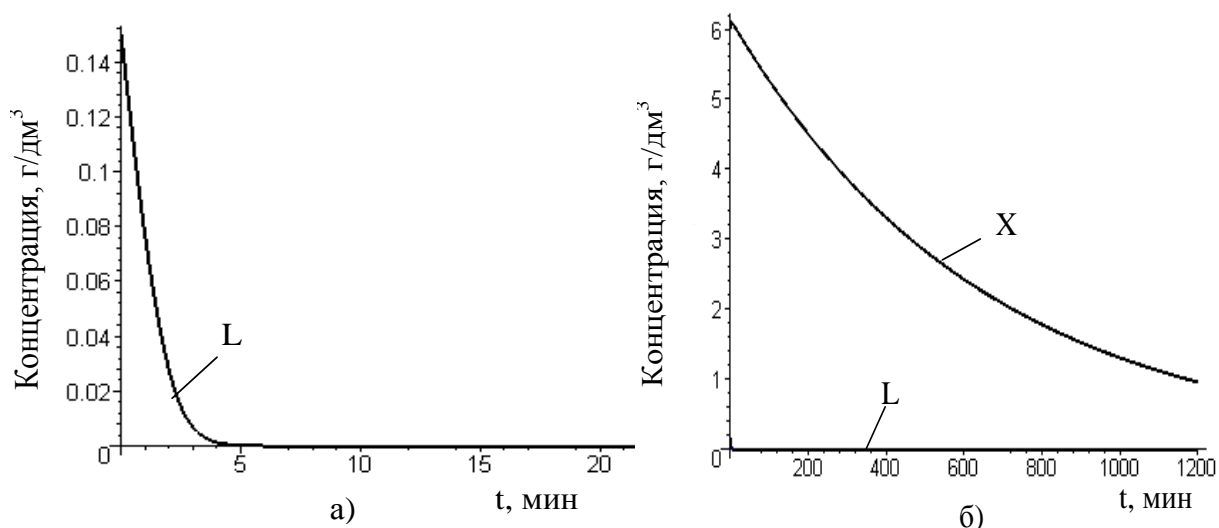


Рисунок 1.2 – Изменение концентрации субстрата L (а) и дозы активного ила X (б) при начальной дозе ила $6,0 \text{ г/дм}^3$

Из рисунка (1.2–б) видно, что происходит не возрастание, а убывание биомассы ила, концентрация которого за 20 часов уменьшается в шесть раз, что не соответствует экспериментальным данным.

Зависимость скорости прироста биомассы активного ила μ от субстрата, предложенная Моно (1.2), по форме совпадает с уравнением Михаэлиса–Ментен [57], которое описывает зависимость скорости ферментативной реакции от концентрации субстрата при условии, что общее количество молекул фермента постоянно и значительно меньше количества молекул субстрата:

$$\mu(L) = \frac{\mu_0 \cdot L}{K_m + L} \quad (1.3)$$

здесь K_m – константа Михаэлиса, одна из важнейших для ферментативных реакций величина, определяемая экспериментально и имеющая смысл и размерность концентрации субстрата, при которой скорость реакции равна половине максимальной.

Закон Михаэлиса–Ментен выводится на основании уравнений химической кинетики и описывает скорость образования продукта. Формула Михаэлиса–Ментен (1.3) отражает более глубокие закономерности кинетики ферментативных реакций, которые в свою очередь определяют жизнедеятельность и рост микроорганизмов, описываемые эмпирической формулой (1.2), этим и определяется сходство уравнений (1.2) и (1.3).

Интерес представляет математическая модель, предложенная Олейником А.Я. и Зябликовым С.В. [52]. В этой модели предлагается учитывать не только кинетику увеличения концентрации микроорганизмов и окисление загрязнений, но и кинетику образования и окисления продуктов автолиза:

$$\frac{dS}{dt} = k_1 \cdot X - k_2 \cdot S \cdot X \quad (1.4)$$

где X , S – концентрации активной части биомассы и продуктов автолиза;
 k_1 – константа скорости автолиза,
 k_2 – константа скорости окисления.

Развитием модели Моно явились модель Н.Д. Иерусалимского [43], в которой учтено влияние продуктов обмена на рост микроорганизмов, и модель Герберта [41], в которой рассматривается процесс отмирания микроорганизмов:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= \frac{\mu_m \cdot XL}{K_L + L} - b \cdot X, \\ \frac{dL}{dt} &= -\frac{\mu_m \cdot XL}{Y(K_L + L)}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где b – константа скорости самоокисления бактерий, описывающая отмирание микроорганизмов.

В модели Кенейла [42] сделана попытка уточнить видовую структуру активного ила. Модель учитывает два трофических уровня и субстрат, пищевая цепь выглядит следующим образом:



где L – субстрат,
 X – бактерии,
 P – простейшие.

Система дифференциальных уравнений, описывающая эту схему, имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= -\frac{\mu \cdot XL}{Y(K_L + L)}, \\ \frac{dX}{dt} &= \frac{\mu \cdot XL}{K_L + L} - \frac{f \cdot XP}{g(K_X + X)}, \\ \frac{dP}{dt} &= \frac{f \cdot XP}{K_X + X}, \end{aligned} \quad (1.6)$$

где f – максимальная удельная скорость роста простейших;
 g – коэффициент трансформации бактерий в простейшие;
 K_X – константа полунасыщения бактерий;
 P – концентрация простейших.

Модель Кенейла лучше соответствует физической сущности процесса очистки и лучше, чем модели Герберта и Иерусалимского, описывает экспериментальную кривую роста биомассы активного ила. Модификация модели Кенейла, предложенная в [44], учитывает наличие в культуре двух видов микроорганизмов, из которых один вид – простейшие – является хищником для другого – бактерий:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= \frac{\mu_m SX}{K_s + S} - \frac{N}{W} \frac{X(Z - K_a X)}{L + K_a X}, \\ \frac{dZ}{dt} &= \frac{K_a \mu_m SX}{K_s + S} + \left(N - \frac{N}{W} \right) \frac{K_a X(Z - K_a X)}{L + K_a X}, \\ \frac{dS}{dt} &= -y \frac{K_a \mu_m SX}{K_s + S}, \end{aligned} \quad (1.7)$$

где Z – концентрация ила по сухому веществу;

N – максимальная удельная скорость роста простейших;

K_a – коэффициент пропорциональности между дегидрогеназной активностью и весом сухих бактерий;

W – отношение количества образовавшихся простейших к количеству поглощенных ими бактерий;

L – коэффициент, численно равный концентрации бактерий, при которой скорость роста простейших равна $N/2$.

Отметим, что модели (1.6) и (1.7) были предложены для описания процессов очистки в аэротенках периодического действия.

В работах [59-62] показано, как на основании немногих биологически правдоподобных и допускающих экспериментальную проверку предположений о механизмах внутри- и межпопуляционных взаимодействий чисто математическими методами вывести заключения о характере динамики системы. К наиболее известным заключениям такого рода можно отнести заключение о возможности эндогенных колебаний численности в системе двух популяций, взаимодействующих по принципу «хищник – жертва»:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \alpha \cdot x - V(x)y, \\ \frac{dy}{dt} &= y(kV(x) - m), \end{aligned} \quad (1.8)$$

где $x(t)$ и $y(t)$ – численность жертв и хищников соответственно,

α и m – коэффициенты естественного прироста жертв и естественной смертности хищников соответственно,

k – часть энергии, полученная хищником за счет потребления жертв и расходуемая на воспроизводство,

$V(x)$ – трофическая функция (функциональный отклик) хищника на плотность жертв.

При малых значениях x , например, когда трофические отношения напряжены и почти все жертвы становятся добычей хищника, трофическую функцию можно считать линейной функцией численности жертв, то есть $V = \beta \cdot x$. Кроме того, предполагая, $k = const$, получено:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \alpha \cdot x - \beta \cdot x \cdot y, \\ \frac{dy}{dt} &= k\beta \cdot xy - my,\end{aligned}\tag{1.9}$$

Система (1.9) с точностью до обозначений совпадает с классической моделью «хищник – жертва» В. Вольтера [67]. Однако, несмотря на то, что модель Вольтера смогла объяснить многие реально наблюдаемые явления, по мнению Свирежева. Ю.М., у нее есть большой недостаток – негрубость (в математическом смысле) вольтеровских циклов, так что при любых сколь угодно слабых возмущениях фазовых координат система переходит с одного цикла на другой [60].

Модель Колмогорова А.Н. [59] представляет собой максимально общее описание системы «хищник – жертва». Если в популяции хищников отсутствует внутривидовая конкуренция, то естественным обобщением вольтеровской модели является модель вида:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \alpha(x)x - V(x)y, \\ \frac{dy}{dt} &= K(x)y,\end{aligned}\tag{1.10}$$

В отличие от модели Вольтера, в модели (1.9) заранее не делается никаких специальных предположений относительно конкретного вида функций α , V и K – коэффициента естественного прироста хищников.

Модель Колмогорова, обладая богатым набором различных фазовых траекторий, могла качественно описать практически любую реальную ситуацию, но ее излишняя общность затрудняла как количественную идентификацию модели, так и интерпретацию полученных результатов. Поэтому появилось достаточно много моделей, занимающих промежуточное положение между вольтеровской и колмогоровской моделями. В известной мере к ним можно отнести модель Розенцвейга и Мак-Артура [63], которая имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \alpha(x)x - V(x)y, \\ \frac{dy}{dt} &= y[kV(x) - m],\end{aligned}\tag{1.11}$$

В работах [45-47, 80-82] были подробно описаны механизмы образования и распада хлопьев активного ила. Показано, что существенное влияние на процессы образования и распада хлопьев оказывает режим перемешивания жидкости в аэротенке. При высокой интенсивности перемешивания движение жидкости в аэротенк можно рассматривать как неупорядоченное, турбулентное. В механизме хлопьеобразования турбулентность играет двойную роль. С одной стороны, за счет более быстрого, по сравнению с броуновским, движения частиц ила в турбулентном потоке увеличивается частота столкновения хлопьев с дисперсными бактериями, то есть турбулентность ускоряет процесс хлопьеобразования [74, 83-85]. С другой стороны, большие градиенты скоростей турбулентного потока могут разрушать хлопья ила, поэтому сильная аэрация объема аэротенка может быть причиной выноса ила. Скорость образования дисперсных бактерий X_d в результате эрозии (диспергации):

$$\left(\frac{dX_d}{dt}\right)_E = K_E \cdot X \cdot G^m\tag{1.12}$$

где K_E – константа скорости эрозии,

X – концентрация хлопьев ила,

m – теоретическая константа,

G – градиент скорости в турбулентном потоке.

Скорость убывания дисперсных бактерий за счет процесса агрегации:

$$\left(\frac{dX_d}{dt}\right)_A = -K_A \cdot X_d \cdot G\tag{1.13}$$

где K_A – константа скорости агрегации.

На сегодняшний день наиболее известными и признанными являются модели активного ила (ASM1 и др.), которые были разработаны специалистами Международной Ассоциации по исследованию и контролю очистки воды (IAWPRC) [68-71]. Эти модели представляют собой систему нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, аналитическое решение которых достаточно сложно. В связи с этим развитие получило большое количество работ по упрощению данных моделей.

Модели позволяют описать процесс удаления из сточных вод органических веществ, соединений азота и фосфора, прирост биомассы активного ила за счет потребления субстрата. Однако, как оказалось на практике, даже эти наиболее полные модели имеют существенные недостатки. Так, в моделях рассматривается только аэротенк и исключен из рассмотрения вторичный отстойник. Осуществляя расчет по указанным моделям, нельзя найти значения концентраций БПК и ХПК, что делает непригодной для практических целей ту часть, где моделируется очистка от органических примесей. Кроме того, используется большое количество констант, требующих дополнительного уточнения для адаптации к условиям конкретного объекта. Также, несмотря на сложность моделей, в них не учтен многовидовой состав микроорганизмов активного ила. В то же время модели являются унифицированными для расчета различных сооружений, в которых осуществляется процесс биологической очистки сточных вод (биофильтры, биологический пруды, аэротенки). В свою очередь это не позволяет учесть особенности процесса очистки в конкретном сооружении с учетом его конструктивных особенностей и изменения факторов, оказывающих влияние на протекание процесса.

Рассмотренные модели дают описание реальных процессов биохимического окисления многокомпонентных сточных вод с допущениями. При этом константы моделей не являются строго постоянными и существенным образом зависят от режима проведения и начальных условий процесса очистки. Таким образом, развитие существующих моделей для адекватного описания процесса биологической очистки в системе «аэротенк – вторичный отстойник» с целью повышения эффективности его работы при очистке городских сточных вод от органических загрязнений является актуальной научно-практической задачей.

1.4 Выбор направления исследования

Выполненный анализ состояния защиты водных объектов от загрязнения неочищенными и недостаточно очищенными сточными водами показал, что, несмотря на разнообразие технологических схем, методов и сооружений, существующие сооружения биологической очистки сточных вод не обеспечивают необходимое качество очистки на выходе из сооружений по ряду показателей, до сих пор полностью не решены вопросы очистки сточных вод от органических загрязнений до показателей не превышающих допустимые. Существующие способы и сооружения очистки сточных вод от органических загрязнений имеют недостаточную эффективность. Это подтверждает необходимость разработки новых технических решений, направленных на повышение эффективности и интенсификацию процесса очистки городских сточных вод.

Проблемы предотвращения загрязнения водоемов недостаточно очищенными сточными водами волновали ученых на протяжении многих лет. Первые работы по теоретическому исследованию процессов, происходящих при протекании биологической очистки сточных вод, принадлежат таким

ученым как А.Н. Колмогоров, Ю.М. Свирежев, Д.О. Логофет. На нынешнем этапе развития науки существует большое количество работ, в которых, опираясь на математическое моделирование, рассматриваются вопросы взаимосвязи составляющих процесса и влияния отдельных факторов на протекание биологической очистки сточных вод. Большое внимание уделяется вопросам, связанным с нарушением технологических процессов сбора, передачи и очистки сточных вод.

Вопросами очистки городских сточных вод, методами повышения эффективности и усовершенствования их работы занимались такие видные ученые и специалисты: Олейник А.Я., Гвоздяк П.И., Василенко А.А., Таварткиладзе И.М., Душкин С.С., Эпоян С.М., Гириоль Н.Н., Грабовский П.А., Юрченко В.А., Ковальчук В. А., Ступин А.Б, Куликов Н.И., Пантелят Г.С., Мацнев А.И., Синев О.П., Вавилин В.А., Жмур Н.С, Кафаров В.В., Яковлев С.В., Скирдов I.B., Воронов Ю.В., W. Guijer, M. Henze, D.H. Eikelboom. и др. Однако полностью не решены вопросы, касающиеся повышения эффективности очистки сточных вод от органических загрязнений.

Анализ технологической работы сооружений очистки показал, что для повышения эффективности их работы необходима разработка нового технологического решения, связанного с регулированием соотношения «сточная вода – активный ил» путем выбора режима работы аэротенка при конкретных условиях его эксплуатации.

Таким образом, актуальным является разработка и научное обоснование метода выбора технологического режима работы аэротенка при очистке городских сточных вод для повышения эффективности работы сооружений биологической очистки.

РАЗДЕЛ 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД В СИСТЕМЕ «АЭРОТЕНК – ВТОРИЧНЫЙ ОТ- СТОЙНИК» (НА ПРИМЕРЕ СООРУЖЕНИЙ КОМПЛЕКСА БИОЛО- ГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ «ДИКАНЕВСКИЙ» Г.ХАРЬКОВ)

2.1 Общая характеристика сооружений комплекса биологической очистки «Диканевский» г.Харьков

Сооружения биологической очистки комплекса биологической очистки «Диканевский» (КБОД) включают в себя аэротенки и вторичные отстойники. Аэротенки представляют собой прямоугольные в плане железобетонные резервуары с размерами секции: длина – 120 м, ширина – 40 м, глубина 5,5 м. В аэротенки подается осветленная вода после механической очистки с концентрацией загрязнений по БПК₅ $L_{св} \approx 0,10$ г/дм³, с концентрацией взвешенных веществ $V_{св} \approx 0,08$ г/дм³. Расход осветленных сточных вод – $q_{св} \approx 0,75$ м³/с, расход активного ила, подаваемого в регенератор одной секции – $q_u = 0,42$ м³/с.

На рис. 2.1-2.2 приведена принципиальная схема секции четырехкоридорного аэротенка.

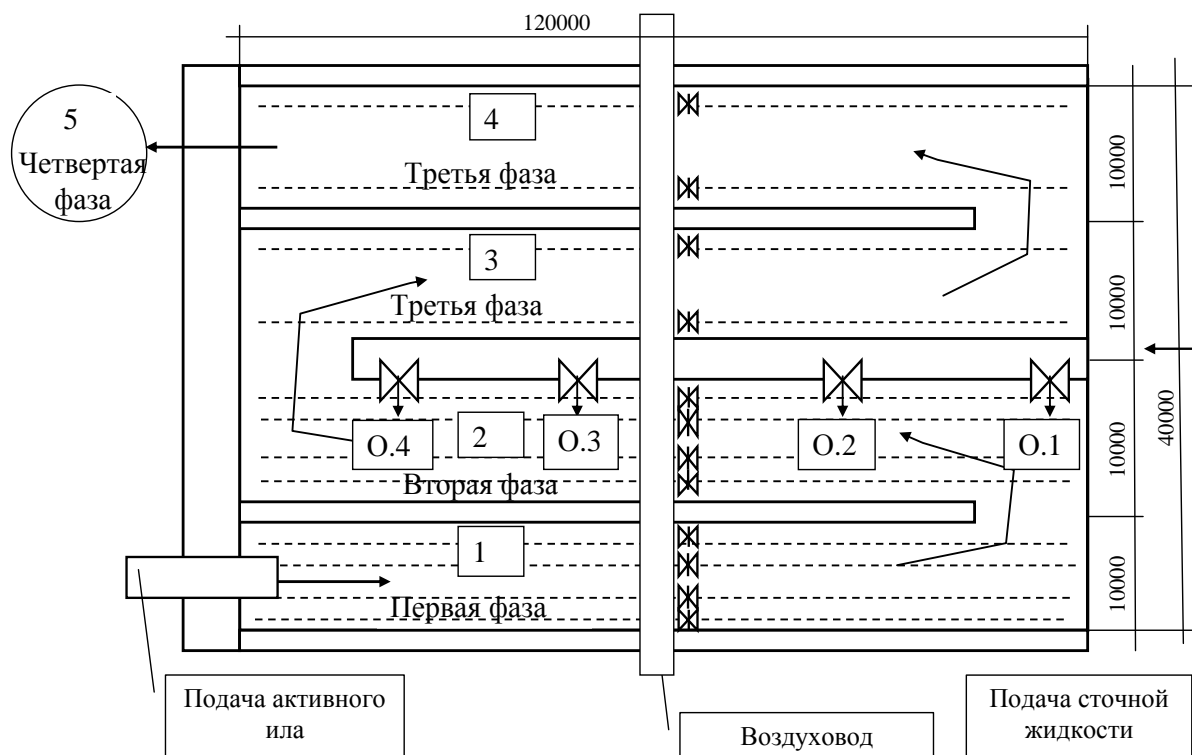


Рисунок 2.1 – Секция четырехкоридорного аэротенка в плане:

1 – первый коридор, 2 – второй коридор, 3 – третий коридор, 4 – четвертый коридор аэротенка, 5 – вторичный отстойник; O.1 – первое впускное окно, O.2 – второе впускное окно, O.3 – третье впускное окно, O.4 – четвертое впускное окно.

В первый коридор аэротенка (регенератор) сосредоточенно подается активный ил от иловой насосной станции. Подача осветленных сточных вод после механической очистки в секцию аэротенка производится во второй коридор сосредоточено по длине коридора через четыре впускных окна. Далее смесь активного ила и осветленной жидкости медленно движется по коридорам аэротенка. На всем пути движения смесь постоянно аэрируется путем подачи сжатого воздуха от компрессорной станции. Время нахождения активного ила и осветленной сточной жидкости в аэротенке составляет примерно 6–8 часов и зависит от расхода сточных вод, поступающих на очистку в аэротенк. В конце четвертого коридора смесь поступает в отводящий канал и самотеком движется по трубопроводам на распределительные чаши вторичных отстойников.

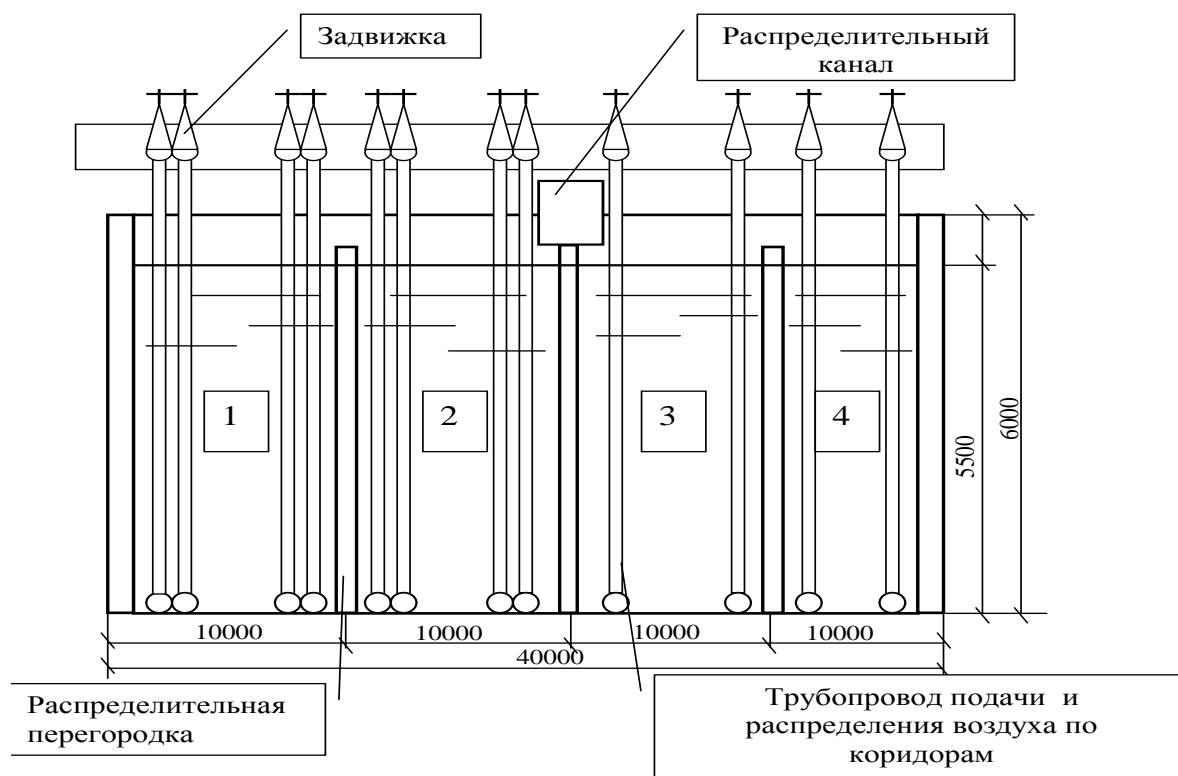


Рисунок 2.2 – Секция четырехкоридорного аэротенка в разрезе:

1 – регенератор (первый коридор), 2 – второй коридор, 3 – третий коридор, 4 – четвертый коридор аэротенка

Воздух в секцию аэротенка подается системой фильтросных труб.

Вторичные радиальные отстойники комплекса представляют собой круглые в плане железобетонные резервуары диаметром 40 м, строительной глубиной – 3,5 м. Вторичные отстойники разделены на группы по 2–4 отстойника. Распределение смеси активного ила и очищенной воды по вторичным отстойникам производится на распределительных чашах. Смесь подается во вторичный отстойник через подающий трубопровод, расположенный в центре отстойника, ниже уровня воды в отстойнике на 1,5–2 м. Очищенная вода медленно движется от центра к периферии, где собирается в отводящий лоток и далее по отводящему каналу к выпуску. Ил оседает на дно отстойни-

ка и под действием гидростатического давления поступает по трубам илососа, движущимся по дну отстойника, в иловую камеру. Затем ил собирается в иловый колодец и самотеком поступает в приемный резервуар иловой насосной станции. Конструкция илового колодца позволяет регулировать отток ила из илового колодца, и таким образом влиять на концентрацию ила по объему. Из приемного резервуара часть активного ила (возвратный ил) перекачивается насосами в регенераторы аэротенков, а часть ила (избыточный активный ил) подается на чаши первичных отстойников или в распределительный канал перед песколовками. Время нахождения активного ила во вторичном отстойнике зависит от расхода смеси активного ила и сточных вод, поступающих на очистку, и составляет около двух часов.

2.2 Исследование показателей возвратного ила, подаваемого в регенератор аэротенка

Возвратный ил является основной составляющей процесса биологической очистки. Для определения основных показателей возвратного ила, циркулирующего в сооружениях биологической очистки КБOD, были проведены исследования его физико-химических свойств. Для проведения исследований использовались современные физико-химические методы исследования и оборудование. При проведении лабораторных исследований гидрохимические показатели возвратного ила определялись по общеизвестным методам анализа сточных вод и активного ила в сертифицированной лаборатории.

Возвратный ил представляет собой темно-коричневые хлопья размером от 53 до 212 мкм, средней плотностью 1,1 – 1,37 г/см³. Бактериальные клетки, расположенные внутри, на поверхности хлопьев представлены незначительным количеством не связанных с хлопьями одиночных бактерий: палочками, кокками, спирохетами и микроколониями из палочек. Рост бактерий в хлопьях значительно превышает рост свободно плавающих (диспергированных) бактерий, так как питательные вещества адсорбируются хлопьями, и в них создаются условия избытка питательного субстрата. Крупные, компактные хлопья ила хорошо осаждаются во вторичных отстойниках, увлекая за собой мелкие дисперсные хлопья, недоокисленные загрязняющие вещества и так далее, дополнительно очищая тем самым сточные воды [86-91].

В сообщество микроорганизмов активного ила входят как одноклеточные микроорганизмы – бактерии, простейшие, так и более сложные многоклеточные организмы – водоросли, грибы, различные черви, личинки насекомых [92, 93]. Каждая из этих групп организмов является необходимым звеном в процессе биологической очистки сточных вод. Ведущая роль в процессах изъятия из сточной жидкости растворенных, коллоидных и крупных органических загрязнений принадлежит бактериям. Бактерии отличаются чрезвычайно активным обменом, то есть очень интенсивным потреблением органических веществ и размножением. Они в большей степени, чем другие микроорганизмы, способны приспосабливаться к неблагоприятным окружающим

условиям. Бактерии достаточно устойчивы к действию ядовитых веществ и легче других живых организмов адаптируются к изменяющимся условиям и новым источникам питания.

Гидрохимический анализ возвратного ила включает в себя определение концентрации ила по массе, илового индекса, растворенного кислорода и зольности. Результаты, полученные с применением сертифицированных методик, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты гидрохимического анализа возвратного ила за период 2005–2010 гг.

Месяц	Показатель			
	Доза ила, мг/дм ³	Иловый индекс, мл/г	Растворенный кислород, мг/дм ³	Зольность, %
	<u>min/max</u> <i>среднее</i>	<u>min/max</u> <i>среднее</i>	<u>min/max</u> <i>среднее</i>	<u>min/max</u> <i>среднее</i>
январь	<u>3,33/7,09</u> 6,15	<u>83/134</u> 92,55	<u>1,9/3,6</u> 3,2	<u>16,3/24,5</u> 21,33
февраль	<u>3,16/6,44</u> 5,59	<u>97/125</u> 105,09	<u>2,2/3,6</u> 3,4	<u>21/25,8</u> 24
март	<u>3,44/4,6</u> 4,08	<u>109/121</u> 117,91	<u>2,3/4,1</u> 3,6	<u>19,9/23,1</u> 22,33
апрель	<u>3,53/5,96</u> 4,42	<u>128/157</u> 149,4	<u>2,5/3,1</u> 2,9	<u>17,7/19,9</u> 18,7
май	<u>3,16/4,32</u> 3,63	<u>137/158</u> 146,5	<u>2,1/3,3</u> 2,8	<u>20,2/21,6</u> 20,7
июнь	<u>3,17/6,22</u> 4,67	<u>95/124</u> 101,8	<u>1,8/2,7</u> 2,4	<u>22,2/25,1</u> 24
июль	<u>3,22/5,15</u> 4,62	<u>118/135</u> 124,3	<u>1,7/2,2</u> 1,98	<u>24,1/29,4</u> 27,3
август	<u>3,53/5,99</u> 5,39	<u>103/152</u> 144,0	<u>1,89/2,2</u> 1,97	<u>24,4/31,6</u> 28,0
сентябрь	<u>3,42/6,15</u> 5,21	<u>110/155</u> 148,6	<u>2,0/2,4</u> 2,2	<u>23,1/24,6</u> 23,3
октябрь	<u>3,53/5,99</u> 4,80	<u>123/153</u> 145,7	<u>1,98/2,8</u> 2,5	<u>21,2/25,4</u> 23,7
ноябрь	<u>3,52/5,83</u> 5,13	<u>125/140</u> 133,1	<u>2,2/2,4</u> 2,3	<u>22,6/24,1</u> 23
декабрь	<u>3,22/4,91</u> 3,87	<u>131/145</u> 139,2	<u>2,1/3,0</u> 2,6	<u>17,4/28,5</u> 22,33
Средний по- казатель	<u>3,35/6,03</u> 4,8	<u>123/134</u> 129,0	<u>2,1/2,8</u> 2,65	<u>18,3/25,6</u> 23,22

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о хорошем качестве возвратного ила. Полученные результаты являются исходными данными для моделирования процесса в регенераторе аэротенка.

Способность активного ила к хлопьеобразованию, седиментации и последующему уплотнению, его способность отдавать влагу – взаимосвязанные, наиболее важные характеристики ила, играющие решающую роль в обеспечении биологической очистки и свойств осадков сточных вод. Иловый индекс в исследуемых образцах изменяется в пределах от 92 до 148 мг/дм³, эти значения соответствуют илу с хорошей способностью к оседанию. Хорошо флокулирующие, сформировавшиеся хлопья позволяют интенсифицировать такие процессы как сорбцию загрязняющих веществ на поверхность хлопьев за счет увеличения их массы; биохимическое окисление загрязняющих веществ; нитрификацию; сохранение ила в системе; снижение мутности за счет развития простейших, связанных с хлопьями.

Процесс образования хлопьев и их последующей агрегации (укрупнения) зависит от нескольких причин, важнейшими среди которых являются [94-100] удовлетворительное продуцирование флокулообразующими бактериями биополимерного геля; поддержание достаточного возраста ила (чем старше ил, тем крупнее хлопья); удовлетворительное перемешивание ила и снабжение его растворенным кислородом; допустимое количество токсикантов в сточных водах; незначительная степень развития в активном иле нитчатых или пенообразующих организмов.

К хлопьям активного ила предъявляются следующие требования: они должны извлекать загрязняющие вещества из воды, а сами хорошо отделяться от очищенной воды осаждением [101-103]. Эти два свойства не обязательно связаны между собой. Молодые, активно растущие хлопья, способны быстро извлекать загрязняющие вещества, но могут иметь неудовлетворительные седиментационные свойства. В то же время окислительная сила хорошо оседающего ила может быть меньше.

2.3 Исследование процесса биологической очистки сточных вод в системе «аэротенк – вторичный отстойник»

Для проведения более детального исследования процесса биологической очистки в системе «аэротенк – вторичный отстойник» предлагается процесс биологической очистки условно разделить на четыре фазы, в каждой из которых происходят свои специфические физико-химические процессы. Хотя эти фазы и являются взаимосвязанными, описание явлений в каждой фазе должно опираться на свою математическую модель. При этом результаты моделирования в каждой фазе должны быть согласованы между собой [102].

Рассматриваемое деление на четыре фазы соответствует системе сооружений биологической очистки «аэротенк – вторичный отстойник». Предложенное деление на фазы позволяет учесть конструктивные особенности сооружений, в которых происходит очистка: четырехкоридорного аэротенка

(промежуточного типа с регенератором, с сосредоточенной подачей активного ила и рассредоточенной подачей сточных вод через четыре впускных окна) и вторичного отстойника радиального типа.

Согласование решений на границах фаз позволяет, вводя значения соответствующих концентраций, учесть объем поступающих загрязнений, взаимное разбавление активного ила и рассредоточено подаваемой сточной жидкости; изменение интенсивности аэрации на разных этапах протекания процесса.

2.3.1 Процессы, происходящие в первом коридоре аэротенка

Возвратный ил, в основном в виде хлопьев, поступает на регенерацию в первый коридор аэротенка для восстановления своих сорбционных свойств и силы окисления ила. Образование хлопьев происходит в основном в четвертом коридоре аэротенка и во вторичном отстойнике и обусловлено практически полным окислением органических соединений сточных вод [103-106]. Для насыщения ила кислородом происходит интенсивное аэрирование его подачей воздуха по всей длине коридора (рис.2.1) [107]. Возвратный ил, поступающий в регенератор, характеризуется количественным преобладанием в своем составе хлопьев (X) и незначительным количеством дисперсных (свободно плавающих) бактерий (Z).

Предлагается первую фазу биологической очистки выделить в первом коридоре аэротенка (регенераторе), началом первой фазы будем считать момент подачи активного ила в регенератор аэротенка. Окончанием первой фазы – конец первого коридора до момента впуска сточных вод. Таким образом, время прохождения первой фазы, то есть, нахождения активного ила в регенераторе, будет зависеть от расхода ила, подаваемого в регенератор, и размеров самого регенератора.

Важность и особенность процесса, происходящего в регенераторе, заключается в том, что одновременно осуществляется синтез клеток микроорганизмов и окисление трудноокисляемых органических веществ [108-111]. Основным строительным материалом для синтеза служат органические вещества, которые были сорбированы хлопьями на выходе из аэротенка и не были израсходованы в отстойнике, так как скорость их окисления относительно мала. Такие явления способствуют тому, что к моменту подачи сточных вод во второй коридор аэротенка возникает значительное количество «голодных» дисперсных бактерий, происходит подготовка микроорганизмов к процессу интенсивного поглощения и переработки органических веществ, содержащихся в сточных водах [112-113]. Гидрохимический анализ показателей активного ила, находящегося в регенераторе аэротенка, приведен в табл.2.2.

Сравнивая результаты, приведенные в табл.2.2 и табл.2.1, видим, что доза возвратного ила и ила, подаваемого в регенератор практически одинакова, различие концентраций можно объяснить смешением поступающего возвратного ила с илом, уже находящимся в сооружении, и взаимным разбавлением.

Таблица 2.2 – Гидрохимические показатели ила в регенераторе аэротенка за 2005–2010 гг.

Месяц	Доза ила, мг/дм ³	Концентрация ила по объему, мл/дм ³	Растворенный кислород, мг/дм ³	Зольность, %
	<u>min/max</u> <i>среднее</i>	<u>min/max</u> <i>среднее</i>	<u>min/max</u> <i>среднее</i>	<u>min/max</u> <i>среднее</i>
январь	<u>4,9/6,8</u> 5,9	<u>78,1/83,7</u> 80,5	<u>4,3/5,0</u> 4,5	<u>23,2/28,4</u> 26,5
февраль	<u>5,6/6,5</u> 6,15	<u>72,2/81,5</u> 78,5	<u>4,2/5,2</u> 5,1	<u>27/36</u> 34
март	<u>5,35/6,7</u> 6,23	<u>68/93,1</u> 81,6	<u>4,8/5,4</u> 5,3	<u>29/39</u> 36
апрель	<u>4,8/6,3</u> 6,1	<u>69,1/79,4</u> 75,5	<u>4,6/4,8</u> 4,75	<u>30/33,7</u> 32
май	<u>4,1/5,1</u> 4,7	<u>58,3/72,2</u> 67,4	<u>4,6/5,1</u> 4,9	<u>31,1/33,7</u> 31
июнь	<u>4,4/5,8</u> 5,56	<u>47,8/61,3</u> 49,4	<u>3,9/4,5</u> 4,2	<u>19,8/22,1</u> 21
июль	<u>4,19/5,3</u> 5,0	<u>45,9/51,2</u> 48,4	<u>5,0/5,2</u> 5,1	<u>29,1/31,9</u> 30
август	<u>4,2/5,6</u> 5,12	<u>52,2/61,9</u> 57,4	<u>4,3/5,0</u> 4,7	<u>19,9/22,7</u> 21,9
сентябрь	<u>4,31/6,1</u> 5,77	<u>68,1/75,5</u> 71,1	<u>5,1/5,6</u> 5,4	<u>23,5/25,6</u> 24,7
октябрь	<u>5,3/6,2</u> 6,1	<u>54,6/58</u> 56,4	<u>4,2/4,8</u> 4,5	<u>22,1/25,9</u> 24,8
ноябрь	<u>5,2/6,7</u> 6,3	<u>54,7/65</u> 61	<u>4,7/5,3</u> 5,1	<u>24,4/28,2</u> 26
декабрь	<u>6,1/6,9</u> 6,7	<u>48,9/61,1</u> 55,8	<u>4,7/5,3</u> 4,8	<u>21,9/26,1</u> 23,3
Средний показатель	<u>4,8/6,2</u> 5,09	<u>59,8/70,3</u> 62,2	<u>4,53/5,1</u> 4,86	<u>25,1/29,3</u> 27,6

Образование дисперсных (свободно плавающих) бактерий является существенным моментом регенерации, так как такие микроорганизмы окисляют органические вещества сточных вод более интенсивно, чем хлопья.

Необходимо отметить значительное увеличение концентрации растворенного кислорода в иле, находящемся в регенераторе, до 5 мг/дм³. Такой результат объясняется интенсивной аэрацией ила. Под действием подаваемого воздуха ил поддерживается во взвешенном состоянии и не имеет возможности оседать. При этом под действием интенсивной аэрации возникают большие турбулентные движения жидкости, которые приводят к разрушению

хлопьев ила на дисперсные составляющие. Процессы, происходящие в первой фазе, а также ее длительность оказывают существенное влияние на количество микроорганизмов, поступающих во вторую фазу, а значит и на стабильность работы аэротенка. Подача возвратного ила в регенератор осуществляется насосом ОПВ 16–87, расход которого составляет 1511 м³/час на одну секцию аэротенка. Подача воздуха осуществляется нагнетателями типа Н–1200 производительностью 750 м³/мин и Н–750 производительностью 670 м³/мин.

Таким образом, взаимопревращение микроорганизмов в первой фазе можно описать моделью, согласно которой происходит уменьшение количества хлопьев X и увеличение за счет этого количества свободно плавающих (дисперсных бактерий Z) с одновременным уменьшением количества дисперсных бактерий Z за счет самоокисления и отмирания.

2.3.2 Описание процессов, происходящих во втором коридоре аэротенка

Во втором коридоре аэротенка происходит смешение активного ила, поступающего из регенератора, со сточной жидкостью, которая поступает в секцию рассредоточено по длине коридора через четыре впускных окна.

Предлагается вторую фазу процесса биологической очистки выделить во втором коридоре аэротенка. Началом второй фазы будем считать первый впуск сточной жидкости через впускное окно (О.1) на подающем канале (рис.2.1). Окончанием второй фазы будет конец второго коридора. Длительность второй фазы очистки будет зависеть от расхода, поступающих на очистку сточных вод, расхода ила, поступающего из регенератора, и размеров второго коридора аэротенка. Кроме того необходимо учесть влияние взаимного разбавления концентраций компонентов активного ила (хлопьев и дисперсных бактерий) и загрязнений в рассредоточено поступающей сточной жидкости. Начальными условиями для моделирования процесса во второй фазе будут результаты, полученные на выходе из первой фазы очистки, и данные о качестве сточных вод, поступающих в аэротенк.

Интенсивность аэрации во второй фазе остается такой же, как и в первой фазе. Активная аэрация необходима для большего контакта органических загрязнений с активным илом; для поддержания активного ила во взвешенном состоянии, для окисления загрязнений, поступивших со сточной жидкостью, а также, так как сохраняется высокая потребность в кислороде [114–115]. Содержащееся в сточных водах органическое вещество подвергается биохимическому окислению в присутствии кислорода воздуха и микроорганизмов-минерализаторов. Скорость этого процесса зависит в первую очередь от наличия свободного кислорода. Процесс биохимического окисления идет в две последующие стадии. В первую очередь микроорганизмами усваиваются (перерабатываются) легко окисляемые органические вещества, на химические преобразования которых расходуется большая (основная) часть кислорода от полного количества необходимого для очистки. Результаты исследования ос-

новных показателей качества сточных вод, поступающих после сооружений механической очистки и подаваемых во вторую фазу процесса биологической очистки, приведены в табл. 2.3. Температура сточных вод изменяется в незначительных пределах, принимая меньшие значения в холодный период года, и увеличиваясь в теплое время. Интересно отметить относительное снижение концентрации загрязнений по БПК₅ и ХПК в теплый период года. Поступление сточных вод в течение года достаточно равномерно, небольшое снижение расхода наблюдается в летние месяцы.

Таблица 2.3 – Показатели сточных вод, поступающих на очистку, за 2005–2010 гг.

Месяц	Показатель			
	Температура воды, °С	БПК ₅ , мг/дм ³	ХПК, мг/дм ³	Средний расход сточных вод на одну секцию аэротенка, м ³ /час
	<u>min/max</u> <i>среднее</i>	<u>min/max</u> <i>среднее</i>	<u>min/max</u> <i>среднее</i>	
январь	<u>13,2/14</u> 13,9	<u>148/155</u> 152	<u>400/407</u> 404	2868
февраль	<u>13,9/14,5</u> 14,3	<u>141/148</u> 146	<u>415/418</u> 404	2687
март	<u>13,5/14</u> 13,9	<u>124/127</u> 126,2	<u>403/411</u> 409	2490
апрель	<u>14,8/16,3</u> 15,9	<u>91,5/95,1</u> 93,5	<u>458/464</u> 463	2739
май	<u>18,1/21,2</u> 19,7	<u>106,8/107,7</u> 107	<u>389/391</u> 390	2579
июнь	<u>20,3/25,6</u> 22,7	<u>51,3/79,1</u> 69,6	<u>427/443</u> 439	2632
июль	<u>22/25</u> 23,5	<u>44,1/63,2</u> 45,7	<u>405/411</u> 407	2683
август	<u>22,1/24</u> 23,6	<u>70,2/78,3</u> 75,1	<u>410/415</u> 413	2527
сентябрь	<u>19,1/22,3</u> 21,5	<u>95,3/101,1</u> 97,2	<u>347/351</u> 349	2574
октябрь	<u>19,5/21,3</u> 20,3	<u>78,5/83</u> 80,9	<u>402/406</u> 403	2728
ноябрь	<u>15,1/18,2</u> 17,6	<u>104/106,3</u> 105,6	<u>361/365</u> 363	2672
декабрь	<u>15,3/16,7</u> 16,4	<u>101/115,1</u> 113,8	<u>373/380</u> 377	2723
Среднее значение	<u>17,3/19,4</u> 18,6	<u>97,1/104,9</u> 104,5	<u>399/405</u> 403	2658,5

После смешения активного ила со сточной жидкостью, поступающей на очистку, на поверхности ила происходит быстрая адсорбция загрязняющих веществ и их коагуляция [104-105]. Таким образом, загрязняющие вещества удаляются благодаря механическому изъятию их активным илом из сточной жидкости и началу процесса внутриклеточного окисления растворенной наиболее легко окисляемой органики.

Во второй фазе начинается процесс биологической очистки сточных вод и интенсивного синтеза клеточного вещества микроорганизмов. Скорость потребления субстрата определяется по изменению содержания органических загрязняющих веществ в очищаемой воде [107, 108], то есть по эффективности изъятия из сточных вод загрязнений регистрируемых показателями ХПК, БПК и др. Кроме этого в этой фазе, как отмечено в [52], увеличивается концентрация продуктов автолиза.

Для описания процессов, происходящих во второй фазе, необходима модель, которая учитывает изменения, происходящие с компонентами активного ила (процесс распада хлопьев на дисперсные бактерии; достаточно резкое возрастание концентрации активного ила, как в виде дисперсных бактерий, так и в виде хлопьев); уменьшение концентрации субстрата (питательно легко усваиваемого бактериями органического вещества). Длительность нахождения смеси активного ила и очищаемых сточных вод во второй фазе зависит от расхода сточных вод и активного ила, от размеров второго коридора аэротенка.

2.3.3 Описание процессов, происходящих в третьем и четвертом коридорах аэротенка

В третьей фазе рассматриваются процессы, происходящие в 3 и 4 коридорах аэротенка после окончания подачи сточных вод. В начале третьей фазы наступают благоприятные условия для развития автотрофных культур, то есть микроорганизмов, которые используют для своего питания углекислый газ, воду, и источник неорганического азота – аммиак, создавая органические вещества своих клеток из неорганических веществ. Значение процесса нитрификации для очистки сточных вод состоит в накоплении запаса кислорода, который может быть использован для окисления органических веществ, не содержащих азот, тогда, когда полностью израсходован для этого процесса весь растворенный кислород, например, во вторичном отстойнике [93, 109-111]. Кроме того, его значение в глубоком изъятии аммонийного азота. Процесс нитрификации является конечной стадией минерализации азотсодержащих органических загрязнений.

Предлагается третью фазу процесса биологической очистки выделить в третьем-четвертом коридорах аэротенка. Началом третьей фазы будем считать начало третьего коридора (рис.2.1). Окончанием третьей фазы будет конец четвертого коридора. Длительность третьей фазы очистки зависит от расхода смеси сточных вод и активного ила, а также от размеров третьего и четвертого коридоров аэротенка. Начальными условиями для моделирования процесса в

третьей фазе будут результаты, полученные на выходе из второй фазы очистки. К концу 3-й фазы очистки (в 4-м коридоре) свободных питательных веществ для гетеротрофных микроорганизмов практически не остается, а все оставшиеся питательные вещества аккумулируются хлопьями, так как для продолжения своего существования микроорганизмам энергетически выгодно уменьшать свою площадь абсорбции и образовывать единые конгломераты в виде хлопьев. Результаты проведенных исследований гидрохимических показателей в смеси активного ила и очищаемой воды приведены в табл.2.4.

Таблица 2.4 Гидрохимические показатели возвратного ила на выходе из аэротенка за период 2005–2010 гг.

Месяц	Доза ила, г/дм ³	Зольность, %	Растворенный кислород, мг/дм ³
	<u>min/max</u> <i>среднее</i>	<u>min/max</u> <i>среднее</i>	<u>min/max</u> <i>среднее</i>
январь	<u>2,9/3,3</u> 3,16	<u>22,3/27</u> 25,3	<u>1,9/2,3</u> 2,2
февраль	<u>2,48/2,7</u> 2,59	<u>31,2/36,8</u> 35	<u>2,7/2,9</u> 2,87
март	<u>3,1/3,5</u> 3,3	<u>33,2/36,8</u> 34,1	<u>2,1/2,4</u> 2,3
апрель	<u>2,5/2,9</u> 2,8	<u>33,2/37</u> 35	<u>2,6/2,8</u> 2,7
май	<u>3,1/3,5</u> 3,35	<u>22,4/28,1</u> 26	<u>2,6/3,1</u> 2,8
июнь	<u>3,0/3,2</u> 3,14	<u>26,2/27,8</u> 27	<u>2,1/2,5</u> 2,3
июль	<u>3,1/3,3</u> 3,21	<u>18,3/19,1</u> 19	<u>1,9/2,3</u> 2,1
август	<u>3,1/3,4</u> 3,24	<u>27,1/30,2</u> 29	<u>1,8/2,2</u> 2,1
сентябрь	<u>2,3/2,8</u> 2,47	<u>11,3/12,7</u> 12,4	<u>1,9/2,3</u> 2,0
октябрь	<u>2,9/3,3</u> 3,2	<u>19,1/21,1</u> 19,5	<u>2,1/2,3</u> 2,2
ноябрь	<u>2,9/3,1</u> 2,98	<u>22,2/24,3</u> 23,6	<u>2,3/2,6</u> 2,5
декабрь	<u>3,2/3,7</u> 3,5	<u>24,1/27,3</u> 26	<u>2,4/3,0</u> 2,8
Среднее значение	<u>2,88/3,22</u> 3,07	<u>23,2/26,3</u> 25,04	<u>2,2/2,6</u> 2,4

Среднее значение дозы ила на выходе из аэротенка составляет $3,07 \text{ г/дм}^3$. Значение зольности ила колеблется в пределах от 12 до 25 %. Значение растворенного кислорода на выходе из аэротенка остается приблизительно одинаковым на протяжении всего рассматриваемого периода.

Модель, описывающая процессы, происходящие в третьей фазе, должна учитывать уменьшение и исчезновение легко усваиваемых органических веществ, продолжение процесса хлопьеобразования; снижение интенсивности размножения гетеротрофных бактерий; процесс активного уничтожения бактерий простейшими; процесс хлопьеобразования за счет агрегации отдельных свободно плавающих бактерий в хлопья.

2.3.4 Исследования процесса очистки во вторичном отстойнике

Смесь активного ила и очищенной жидкости после аэротенка поступает во вторичный отстойник. Предлагается четвертую фазу процесса биологической очистки выделить во вторичном отстойнике.

Началом четвертой фазы будем считать точку поступления смеси ила и очищаемой жидкости в отводящий канал аэротенка (рис.2.1). Окончанием четвертой фазы будет поступление очищенной воды в сборный лоток вторичного отстойника.

Длительность четвертой фазы очистки будет зависеть от расхода смеси сточных вод и активного ила, а также от размеров вторичного отстойника и системы трубопроводов между аэротенком и подающим трубопроводом, расположенным в центре отстойника. Время нахождения активного ила в системе трубопроводов и во вторичном отстойнике регламентируется тем, что длительное нахождение ила на дне отстойника приводит к излишнему его уплотнению.

Начальными условиями для моделирования процесса в четвертой фазе будут результаты, полученные на выходе из третьей фазы очистки. Эффективность работы вторичного отстойника оценивается по концентрации органических загрязнений на выходе из сооружений очистки (табл.2.5). Анализ полученных данных показывает, что концентрация загрязнений по БПК₅ в очищенных водах изменяется в пределах от 8 до $19,5 \text{ мг/дм}^3$.

Необходимо отметить, что некоторые показатели превышают ПДС, установленный на уровне 15 мг/дм^3 . Концентрация загрязнений по ХПК в очищенных водах получена в пределах от 23 до 81 мг/дм^3 , и также наблюдается превышение ПДС, установленный на уровне 80 мг/дм^3 .

При построении математической модели явлений, происходящих в четвертой фазе, необходимо учитывать время нахождения активного ила во вторичном отстойнике; изменение дозы ила; способность ила к оседанию.

Таблица 2.5 – Показатели качества очищенных вод за период 2005–2010 гг.

Месяц	БПК ₅ , мг/дм ³	ХПК, мг/дм ³
	<u>min/max</u> <i>среднее</i>	<u>min/max</u> <i>среднее</i>
январь	<u>13,1/15,3</u> 14,6	<u>61/70</u> 65
февраль	<u>14,9/16,0</u> 15,6	<u>53/61</u> 56
март	<u>10,9/12,3</u> 11,5	<u>43/48</u> 47
апрель	<u>13,0/11,1</u> 12,9	<u>44/53</u> 45
май	<u>9,0/10,1</u> 9,4	<u>33/41</u> 37
июнь	<u>10,1/11,1</u> 10,3	<u>20/25</u> 23
июль	<u>9,0/9,5</u> 9,1	<u>30/33</u> 31
август	<u>14,1/18,4</u> 17,4	<u>70/75</u> 71
сентябрь	<u>8,1/10,1</u> 9,0	<u>28/37</u> 33
октябрь	<u>9,1/10,3</u> 9,5	<u>31/43</u> 37
ноябрь	<u>14,1/20,1</u> 19,6	<u>79/84</u> 81
декабрь	<u>7,8/9,9</u> 8,4	<u>29/37</u> 34
Среднее значение	<u>10,94/13,1</u> 12,3	<u>43/51</u> 47

Выводы к разделу 2

1. Для описания полного цикла работы системы аэротенк – вторичный отстойник предложено процесс биологической очистки разбить на четыре отдельные фазы. Первые три фазы описывают протекание процесса очистки в четырехкоридорном аэротенке промежуточного типа с рассредоточенной подачей сточной жидкости и сосредоточенной подачей активного ила. Четвертая фаза описывает процесс во вторичном отстойнике.

2. Предложено при описании изменения концентрации активного ила в процессе очистки рассматривать отдельно составляющие активного ила: дисперсные бактерии и хлопья.

3. Показано, что для описания взаимопревращения микроорганизмов в первой фазе необходима модель, согласно которой происходит уменьшение количества хлопьев и увеличение за счет этого количества дисперсных бактерий с одновременным уменьшением дисперсных бактерий за счет самоокисления и отмирания.

4. Показано, что для описания процессов, происходящих во второй фазе, необходима модель, которая учитывает возрастание количества активного ила, как в виде дисперсных бактерий, так и в виде хлопьев; уменьшение концентрации загрязнений.

5. Показано, что модель, описывающая процессы, происходящие в третьей фазе, должна учитывать: уменьшение концентрации легко усваиваемых органических веществ, снижение интенсивности размножения; процесс хлопьеобразования за счет агрегации отдельных бактерий в хлопья.

6. Показано, что при моделировании явлений, происходящих в четвертой фазе, необходимо учитывать время нахождения активного ила во вторичном отстойнике, изменение дозы ила.

РАЗДЕЛ 3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

3.1 Математическое описание изменения концентраций загрязнений, составляющих активного ила и продуктов автолиза в аэротенке с использованием константы полунасыщения

Модель процесса биологической очистки сточных вод должна позволять проводить изучение сложного процесса очистки по частям. Это даст возможность повысить точность и надежность результатов; установить связи между отдельными элементами и выяснить их роль в работе сооружения в целом. При описании процесса биологической очистки сточных вод необходимо учитывать такие процессы как распад хлопьев на отдельные компоненты (дисперсные бактерии) в результате интенсивной аэрации; увеличение концентрации активного ила, как в виде свободно плавающих (дисперсных) бактерий, так и в виде хлопьев за счет потребления загрязнений; уменьшение концентрации субстрата за счет потребления его бактериями; накопление в системе аэротенк – вторичный отстойник инертной трудноокисляемой массы [116-118]. Длительность нахождения смеси активного ила и очищаемых сточных вод в исследуемом аэротенке зависит от расхода подаваемых сточных вод и активного ила, а также от размеров отдельных частей сооружения, в котором происходит процесс биологической очистки.

Опираясь на предложенное во втором разделе описание процессов биологической очистки сточных вод в системе «аэротенк – вторичный отстойник», согласно которому весь процесс можно разделить на четыре фазы, а также с учетом существующих математически моделей, описывающих отдельные процессы, происходящие в системе «аэротенк – вторичный отстойник», нами предложена математическая модель в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\mu L}{K_L + L} X - \beta X + k_4 S X + k_2 G X Z - k_1 G^m X, \quad (3.1)$$

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{\mu L}{K_L + L} Z - \lambda Z + k_4 S Z + k_1 G^m X - k_2 G Z X, \quad (3.2)$$

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{1}{Y} \frac{\mu}{K_L + L} (X + Z) L, \quad (3.3)$$

$$\frac{dS}{dt} = (k_3 - k_4 S)(X + Z), \quad (3.4)$$

где X , Z , S , L – концентрации, соответственно, хлопьев, дисперсных бактерий, продуктов автолиза и загрязнений, $\Gamma \cdot (\text{дм}^3)^{-1}$;

μ – максимальная удельная скорость роста хлопьев, мин^{-1} ;

K_L – константа полунасыщения, $\text{г} \cdot (\text{дм}^3)^{-1}$;

k_1 – константа скоростивремени диспергации хлопьев, мин ;

k_2 – константа, характеризующая скорость агрегации хлопьев, $\text{дм}^3 \cdot \text{г}^{-1}$;

G – градиент скорости движения в турбулентном потоке, мин^{-1} ;

β и λ – удельные скорости убывания массы соответственно хлопьев и дисперсных бактерий, мин^{-1} ;

k_3 – константа, определяющая скорость образования продуктов автолиза, мин^{-1} ;

k_4 – константа, определяющая скорость окисления продуктов автолиза, $\text{дм}^3 / (\text{г} \cdot \text{мин})$;

m – константа пропорциональности,

Y – экономический коэффициент, $\text{г} \cdot \text{г}^{-1}$.

Возвратный ил предложено рассматривать в виде двух отдельных компонентов – хлопьев и дисперсных (свободно плавающих) бактерий.

Уравнение (3.1) описывает изменение концентрации хлопьев. В (3.1) первое слагаемое соответствует стандартной модели Моно [40] и учитывает, что рост хлопьев обусловлен потреблением субстрата. Второе слагаемое в (3.1) учитывает убывание хлопьев за счет эрозии и потребления их простейшими [41, 47]. Третье слагаемое, введенное нами, учитывает увеличение концентрации хлопьев за счет потребления продуктов автолиза. Четвертое, введенное нами слагаемое, описывает увеличение концентрации хлопьев за счет процесса агрегации дисперсных бактерий в хлопья. Введение дополнительных слагаемых позволяет учесть особенности протекания процесса биологической очистки в зависимости от концентрации хлопьев и дисперсных бактерий. Пятое слагаемое учитывает уменьшение концентрации хлопьев за счет диспергации в результате действия аэрации.

Уравнение (3.2) описывает изменение концентрации дисперсных бактерий. Первое слагаемое в (3.2), описывающее изменения концентрации дисперсных бактерий за счет потребления загрязнений, соответствует стандартной модели Моно [40]. Второе слагаемое и третье слагаемые в (3.2), введенные нами, учитывают убывание дисперсных бактерий за счет их отмирания и окисления, и увеличение концентрации дисперсных бактерий за счет потребления продуктов автолиза соответственно. Четвертое слагаемое описывает увеличение концентрации дисперсных бактерий за счет процесса диспергирования хлопьев. Пятое слагаемое учитывает уменьшение концентрации дисперсных бактерий за счет процесса агрегации дисперсных бактерий в хлопья.

Уравнение (3.3) описывает изменение концентрации загрязнений, в зависимости от скоростей потребления субстрата хлопьями и дисперсными бактериями.

Изменение концентрации продуктов автолиза описывается уравнением (3.4), в котором нами в отличие от [52] учтено, что автолиз является результатом деятельности хлопьев и дисперсных бактерий.

Решение системы уравнений (3.1)–(3.4) находилось для каждой фазы отдельно, а фаза 2 с учетом распределенной подачи сточных вод разбивалась дополнительно на четыре подфазы. Значения, полученные в результате численного решения системы уравнений для каждой фазы, являются начальными условиями для последующей фазы биологической очистки.

Для решения системы дифференциальных уравнений (3.1)–(3.4) использовался встроенный пакет DEtools программного средства Maple 7. Для построения двумерных графиков использовалась функция plot. Для проведения расчетов была составлена последовательность операторов с использованием встроенных пакетов. Время расчета с использованием указанных пакетов составляет в среднем от 15 до 30 с.

Расчеты были выполнены при условиях, которые соответствуют работе сооружений на КБОД. Расход активного ила, подаваемого в регенератор, $q_u = 25,2$ м³/мин, доза ила $a_u = 6$ г/дм³, а концентрация остаточных загрязнений на входе в регенератор $L_i = 0,015$ г/дм³. Предполагаем также, что концентрация дисперсных бактерий $Z_i \approx 0$, то есть происходит практически полный процесс хлопьеобразования. Расход сточных вод составляет $q_{cs} = 45,13$ м³/мин с концентрацией загрязнений по органическим веществам $L_{cs} = 0,15$ г/дм³. С учетом разной интенсивности подачи воздуха в фазах 1, 2 и фазе 3 нами были приняты соответствующие значения параметров $G = G_{1-2} = 1,6 \cdot 10^4$ мин⁻¹ и $G = G_3 = 1,6 \cdot 10^3$ мин⁻¹ [54], для фазы 4 (вторичный отстойник) $G = G_4 = 0$ мин⁻¹. Результаты численных расчетов методом Рунге-Кутты при указанных выше величинах и при значениях параметров $m = 2$, $k_1 = 5 \cdot 10^{-10}$ мин, $k_2 = 2,4 \cdot 10^{-5}$ дм³/г взятых из [54], приведены на рис. 3.1 – 3.3.

Анализируя полученные результаты (рис. 3.1) видим, что в первой фазе (в регенераторе) происходит снижение концентрации хлопьев и субстрата, увеличение концентрации дисперсных бактерий. На выходе из регенератора получены значения $X = 3,6$ г/дм³, $Z = 0,6$ г/дм³ причем значение X по величине близко к измеряемым величинам. Хотя необходимо отметить, что полученное решение показывает достаточно резкое уменьшение суммарной концентрации компонентов активного ила в регенераторе аэротенка приблизительно на 2 г/дм³. Концентрация остаточных загрязнений на выходе из первой фазы очистки снижается практически до нуля $L \approx 0$ г/дм³.

Результаты расчета для второй фазы очистки (рис. 3.2 а–г) показывают, что происходит постепенное снижение концентрации хлопьев и увеличение концентрации дисперсных бактерий.

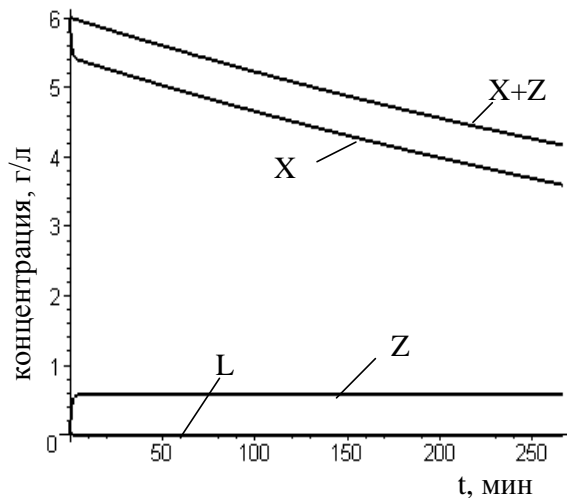


Рисунок 3.1 – Изменение концентраций хлопьев X , дисперсных бактерий Z и загрязнений L в первой фазе очистки

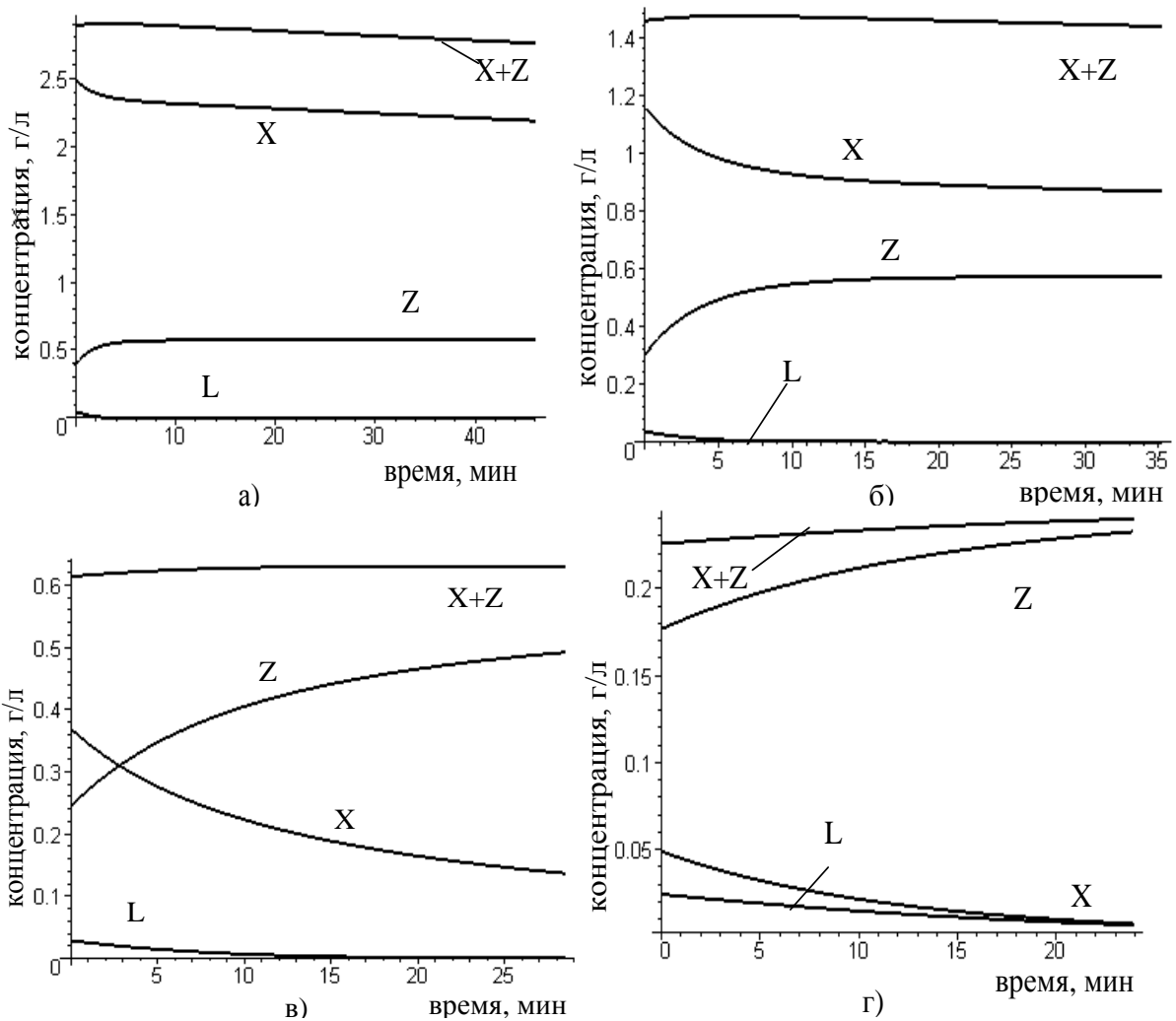


Рисунок 3.2 – Изменение концентраций хлопьев X , дисперсных бактерий Z и загрязнений L во второй фазе очистки а)–г) 1-й, 2-й, 3-й и 4-й выпуски сточных вод соответственно

На выходе из второй фазы очистки было получено (рис. 3.2 г), что концентрация хлопьев снижается практически до нуля, а концентрация дисперсных бактерий возрастает до $Z = 0,24 \text{ г/дм}^3$.

В конце третьей фазы (рис. 3.3) получены следующие значения концентраций: $X = 0,01 \text{ г/дм}^3$, $Z = 0,23 \text{ г/дм}^3$. Доза активного ила $a = X + Z = 0,24 \text{ г/дм}^3$ на выходе из аэротенка существенно меньше измеряемого значения $a_{\text{э}} = 3 - 4 \text{ г/дм}^3$.

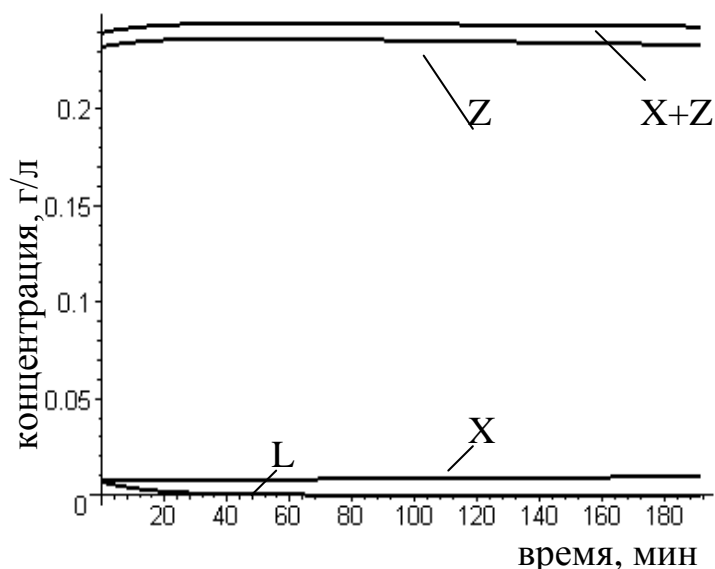


Рисунок 3.3 – Изменение концентраций хлопьев X , дисперсных бактерий Z и загрязнений L в третьей фазе очистки

При этом основную часть составляют дисперсные бактерии, которые практически не оседают во вторичном отстойнике, а составляющая хлопьев не превышает 25 %. Значение концентрации субстрата также значительно меньше измеряемых величин $L_{\text{э}} \approx 0,015 \text{ г/дм}^3$. Полученные значения концентраций хлопьев и дисперсных бактерий соответствуют высокой концентрации взвешенных веществ в осветляемой воде и выносу их в водоем.

Нами были предприняты попытки согласовать между собой результаты расчетов с экспериментальными значениями X и L путем введения вместо одного параметра μ двух μ_X и μ_Z в уравнениях (3.1), (3.2) и (3.3), а также путем варьирования параметров $G_{1,2}$ и G_3 , значения которых согласно [56-57] могут изменяться в определенных пределах. Однако такие расчеты, а также учет уравнения (3.4) не позволили улучшить согласие полученных значений a и L с экспериментальными величинами. Таким образом, можно сделать вывод, что уравнения, предложенные для теоретического описания процессов биологической очистки сточных вод в аэротенках, не дают удовлетворительного описания процессов в реальных условиях. Их применение ограничивается параметрами сооружения в конкретных условиях его работы.

3.2 Усовершенствование математического описания изменения концентраций загрязнений, составляющих активного ила и продуктов автолиза в системе «аэротенк – вторичный отстойник»

Для описания процессов, происходящих в системе «аэротенк – вторичный отстойник» с учетом конструктивных особенностей сооружений, участвующих в процессе очистки, нами предлагается в модели (3.1) –(3.2) для описания изменения концентрации составляющих активного ила (хлопьев и дисперсных бактерий), а также изменения концентрации загрязнений, использовать зависимость, предложенную в [57].

Формальное описание сводится к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dX}{dt} = (-a_x + b_x \cdot L) \cdot X + k_2 G \cdot X \cdot Z - k_1 \cdot G^m \cdot X + k_4 \cdot S \cdot X \quad (3.5)$$

$$\frac{dZ}{dt} = (-a_z + b_z \cdot L) \cdot Z - k_2 \cdot G \cdot X \cdot Z + k_1 \cdot G^m \cdot X + k_4 \cdot S \cdot Z \quad (3.6)$$

$$\frac{dL}{dt} = -(g_x X + g_z Z) L \quad (3.7)$$

$$\frac{dS}{dt} = (k_3 - k_4 S)(X + Z), \quad (3.8)$$

где X , Z , S , L – концентрации, соответственно, хлопьев, дисперсных бактерий, продуктов автолиза и загрязнений, г/дм³;

k_1 – константа скорости диспергации хлопьев, мин;

k_2 – константа, характеризующая скорость агрегации хлопьев, дм³/г;

G – градиент скорости в турбулентном потоке, учитывающий расход воздуха, мин⁻¹;

k_3 – константа, определяющая скорость образования продуктов автолиза, мин⁻¹;

k_4 – константа, определяющая скорость окисления продуктов автолиза, дм³·(г·мин)⁻¹;

m – константа пропорциональности;

a_x – скорость отмирания хлопьев, дм³·(г·мин)⁻¹;

a_z – скорость отмирания дисперсных бактерий, дм³·(г·мин)⁻¹;

b_x , b_z – скорости образования хлопьев и дисперсных бактерий за счет размножения, мин⁻¹;

g_x , g_z – скорости потребления субстрата хлопьями и дисперсными бактериями, дм³·(г·мин)⁻¹.

Независимой переменной является время движения потока по коридору аэротенка. Временной интервал разбивается на участки, границы которых за-

даются местом подачи сточных вод. Согласование решений на границах участков позволяет, вводя значения соответствующих концентраций, учесть объем загрязнений.

Уравнение (3.5) описывает изменение концентрации хлопьев с учетом таких процессов, как потребление субстрата (загрязнений), агрегации дисперсных бактерий в хлопья, распада хлопьев на дисперсные бактерии в результате аэрации, процесс потребления продуктов автолиза, отмирание хлопьев. В уравнениях (3.5) и (3.6) первые слагаемые соответствуют модели [675] для двух хищников, которые потребляют одинаковую пищу, где активный ил играет роль «хищника», а субстрат – роль «жертвы», количество которой только уменьшается. Второе слагаемое в (3.5), введенное нами, описывает увеличение концентрации хлопьев за счет процесса агрегации дисперсных бактерий в хлопья [54-56], а третье слагаемое учитывает убывание хлопьев за счет диспергации [54-56], следствием чего является образование дисперсных бактерий.

Уравнение (3.6) описывает изменение концентрации дисперсных бактерий с учетом следующих процессов: потребление субстрата (загрязнений), агрегации дисперсных бактерий в хлопья, распада хлопьев на дисперсные бактерии в результате аэрации, процесс потребления продуктов автолиза, отмирание дисперсных бактерий.

В уравнении (3.6) второе слагаемое описывает уменьшение концентрации дисперсных бактерий за счет процесса агрегации, а третье слагаемое учитывает увеличение концентрации дисперсных бактерий за счет диспергации хлопьев [56]. Четвертые слагаемые в уравнениях (3.5) и (3.6) описывают увеличение соответственно концентраций хлопьев и дисперсных бактерий за счет потребления продуктов автолиза.

Уравнение (3.7) описывает изменение концентрации загрязнений [67], в зависимости от скоростей потребления субстрата хлопьями и дисперсными бактериями.

Уравнение (3.8) описывает процесс образования продуктов автолиза [52]. Нами дополнительно учтено, что процесс автолиза является результатом деятельности не только хлопьев, но и дисперсных бактерий.

Решение предложенной системы (3.5)–(3.8) следует искать с такими начальными условиями: $X(0) = X_i$, $Z(0) = 0$, $S(0) = S_i$, $L(0) = L_i$, $L_s(t) = L_s$. В этих условиях нами учтено, что на входе в регенератор дисперсные бактерии практически отсутствуют, так как их седиментационные свойства малы и вследствие этого они выносятся вместе с очищенной водой. Нами предполагается также, что продукты автолиза образуются уже в процессе отстаивания и в определенной концентрации S_i поступают в регенератор. Величина L_i описывает концентрацию остаточного сорбированного хлопьями субстрата. Влияние размеров аэротенка на характер процесса очистки учитывается в модели (3.5)–(3.8) через взаимосвязь времени протекания процесса и объема соответствующей части сооружения.

При протекании процесса в регенераторе в первой фазе очистки решение системы (3.5)–(3.8) рассматривалось нами на временном интервале $[0, T_0]$. Время регенерации T_0 определяется равенством $T_0 = V_p / q_i$, где V_p – объем регенератора, м^3 , а q_i – расход активного ила, $\text{м}^3/\text{мин}$. Полученные в результате решения системы (3.5)–(3.8) значения концентраций $X(T_0)$, $Z(T_0)$, $S(T_0)$ и $L(T_0)$ следует рассматривать как исходные концентрации для описания процессов во второй фазе очистки.

Вторая фаза очистки с учетом распределенной подачи сточных вод на распределительном канале аэротенка разбивается дополнительно на четыре подфазы. Поэтому решение системы (3.5)–(3.8) для второй фазы очистки рассматривается на разных временных интервалах. При рассмотрении протекания процесса в первой подфазе (подача сточных вод через первое окно на распределительном канале (рис. 2.1)) учитывается временной интервал $[T_0, t_{21}]$. Время $t_{21} = T_0 + T_1$, где $T_1 = \frac{V_{21}}{q_i + q_{s1}}$, V_{21} – объем части коридора аэротенка, в кото-

ром протекает первая подфаза второй фазы очистки; q_{s1} – расход сточной жидкости, $\text{м}^3/\text{мин}$, подаваемой через одно окно на подводящем канале аэротенка. Полученные в результате решения системы (3.5)–(3.8) значения концентраций $X(t_{21})$, $Z(t_{21})$, $S(t_{21})$ и $L(t_{21})$ являются исходными концентрациями для описания процессов во второй подфазе второй фазы очистки.

Для второй подфазы (вторая подача сточных вод) решение системы находилось на временном интервале $[t_{21}, t_{22}]$. Время $t_{22} = T_2 + t_{21}$, где $T_2 = \frac{V_{22}}{q_i + 2 \cdot q_{s1}}$, V_{22} – объем части коридора аэротенка, в котором протекает вторая подфаза второй фазы очистки. Полученные в результате решения системы (3.5)–(3.8) значения концентраций $X(t_{22})$, $Z(t_{22})$, $S(t_{22})$ и $L(t_{22})$ являются исходными концентрациями для описания процессов в третьей подфазе второй фазы очистки.

Для третьей подфазы (третья подача сточных вод) решение системы находилось на временном интервале $[t_{22}, t_{23}]$. Время $t_{23} = T_3 + t_{22}$, где $T_3 = \frac{V_{23}}{q_i + 3 \cdot q_{s1}}$, V_{23} – объем части коридора аэротенка, в котором протекает третья подфаза второй фазы очистки.

Полученные в результате решения системы (3.5)–(3.8) значения концентраций $X(t_{23})$, $Z(t_{23})$, $S(t_{23})$ и $L(t_{23})$ являются исходными концентрациями для описания процессов в четвертой подфазе второй фазы очистки.

И, соответственно, для четвертой подфазы (подача сточных вод через четвертое окно) решение системы находилось на временном интервале

$[t_{23}, t_{24}]$. Время $t_{24} = T_4 + t_{23}$, где $T_4 = \frac{V_{24}}{q_i + 4 \cdot q_{s1}}$, V_{24} – объем части коридора аэротенка, в котором протекает четвертая подфаза второй фазы очистки.

Полученные в результате решения системы (3.5)–(3.8) значения концентраций $X(t_{24})$, $Z(t_{24})$, $S(t_{24})$ и $L(t_{24})$ являются исходными концентрациями для описания процессов в третьей фазе очистки сточных вод.

Решение системы (3.5)–(3.8) в третьей фазе очистки следует искать на временном интервале $[t_{24}, t_3]$. Время $t_3 = T_5 + t_{24}$, где время протекания процесса в третьей фазе очистки T_5 (время прохождения смеси очищаемой воды и активного ила) определяется равенством $T_5 = V_{3+4} / (q_i + 4 \cdot q_{s1})$. V_{3+4} – объем третьего и четвертого коридоров аэротенка, m^3 , а q_i и q_s – расход активного ила и сточной жидкости, подаваемой через одно окно, соответственно, $m^3/\text{мин}$. Полученные в результате решения системы (3.5)–(3.8) значения концентраций $X(t_3)$, $Z(t_3)$, $S(t_3)$ и $L(t_3)$ следует рассматривать как исходные концентрации для описания процессов во вторичном отстойнике.

Для четвертой фазы (вторичный отстойник) решение системы следует искать на временном интервале $[t_3, t_4]$. Время $t_4 = T_6 + t_3$, T_6 – время нахождения смеси активного ила и очищенной воды в отстойнике. Полученные в результате решения системы (3.5)–(3.8) значения концентраций $X(t_4)$, $Z(t_4)$, $S(t_4)$ являются исходными концентрациями для описания процессов в первой фазе очистки сточных вод.

Нами было получено численное решение предложенной системы уравнений (3.5)–(3.8) методом Рунге – Кутты при следующих значениях: расход сточных вод составляет $q_{ce} = 45,13$ м³/мин с концентрацией загрязнений $L_{ce} = 0,15$ г/дм³. С учетом разной интенсивности подачи воздуха в фазах 1, 2 и фазе 3 нами были приняты соответствующие значения параметров $G = G_{1-2} = 1,6 \cdot 10^4$ мин⁻¹ и $G = G_3 = 2 \cdot 10^3$ мин⁻¹, $m = 2$, $k_1 = 5 \cdot 10^{-10}$ мин⁻¹, $k_2 = 2,4 \cdot 10^{-5}$ дм³/г взятых из [56], $a_x = 1,2 \cdot 10^{-3}$ мин⁻¹, $b_x = 7 \cdot 10^{-2}$ дм³·(г·мин)⁻¹, $a_z = 3 \cdot 10^{-3}$ мин⁻¹, $b_z = 3,7 \cdot 10^{-1}$ дм³·(г·мин)⁻¹, $g_x = g_z = 2,5 \cdot 10^{-3}$ дм³·(г·мин)⁻¹. Отметим, что значения пяти параметров a_x , a_z , b_x , g_x , g_z находились нами путем подбора к известному значению концентрации хлопьев X на выходе из аэротенка. Для решения системы дифференциальных уравнений (3.5)–(3.8) использовался встроенный пакет DEtools программного средства Maple 7. Для построения двумерных графиков использовалась функция plot, для построения трехмерных графиков – функция plot3d программного средства Maple 7. Для проведения расчетов бы-

ла составлена последовательность операторов с использованием встроенных пакетов. Время расчета с использованием указанных пакетов составляет в среднем от 15 до 30 с. Результаты численного решения системы уравнений (3.5)–(3.8) приведены на рис. 3.4-3.6.

На рис. 3.4 приведены результаты численного решения системы уравнений (3.5)–(3.8) для первой фазы очистки.

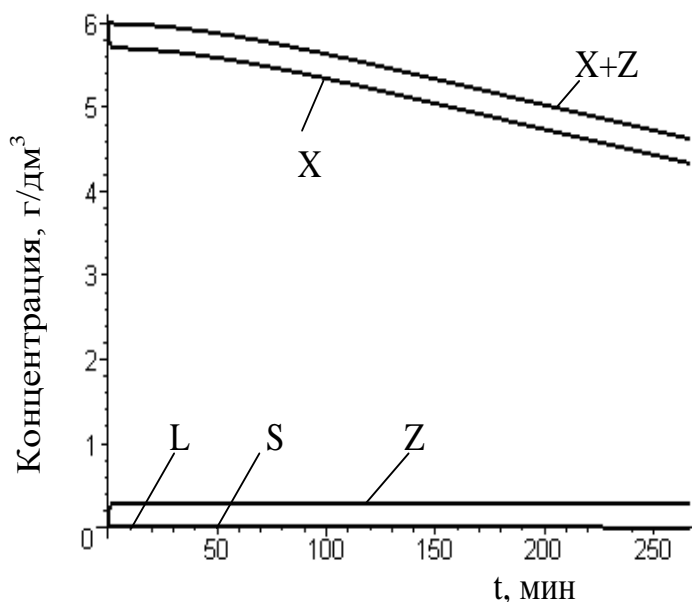


Рисунок 3.4 – Изменение концентраций хлопьев X , дисперсных бактерий Z , продуктов автолиза S и загрязнений L в первой фазе очистки

Расчеты были выполнены при тех же условиях, которые приведены в пункте 3.1 при решении системы уравнений (3.1)–(3.4).

Анализируя результаты, полученные для первой фазы очистки (рис.3.4), видим, что в первой фазе происходит незначительное снижение концентрации хлопьев и увеличение концентрации дисперсных бактерий. Концентрация растворенных загрязнений, поступивших в регенератор, снижается практически до нуля. Полученный результат хорошо согласуется с теоретическими предпосылками, изложенными в разделе 2.3.1.

На рис. 3.5 (а–г) приведены результаты расчета для второй фазы очистки.

Показано, что после каждого впуска сточных вод происходит увеличение сначала небольшое снижение концентрации хлопьев и дисперсных бактерий за счет разбавления. Этот результат (рис.3.5 г) хорошо согласуется с изложенным в разделе 2.3.2 тезисом о том, что во второй фазе очистки происходит уменьшение концентрации активного ила, как в виде дисперсных бактерий, так и в виде хлопьев. При этом концентрации хлопьев и дисперсных бактерий возрастают, что, в свою очередь, связано с процессом распада хлопьев на дисперсные бактерии и приростом хлопьев за счет потребления загрязнений, однако концентрация хлопьев и дисперсных бактерий в целом снижается.

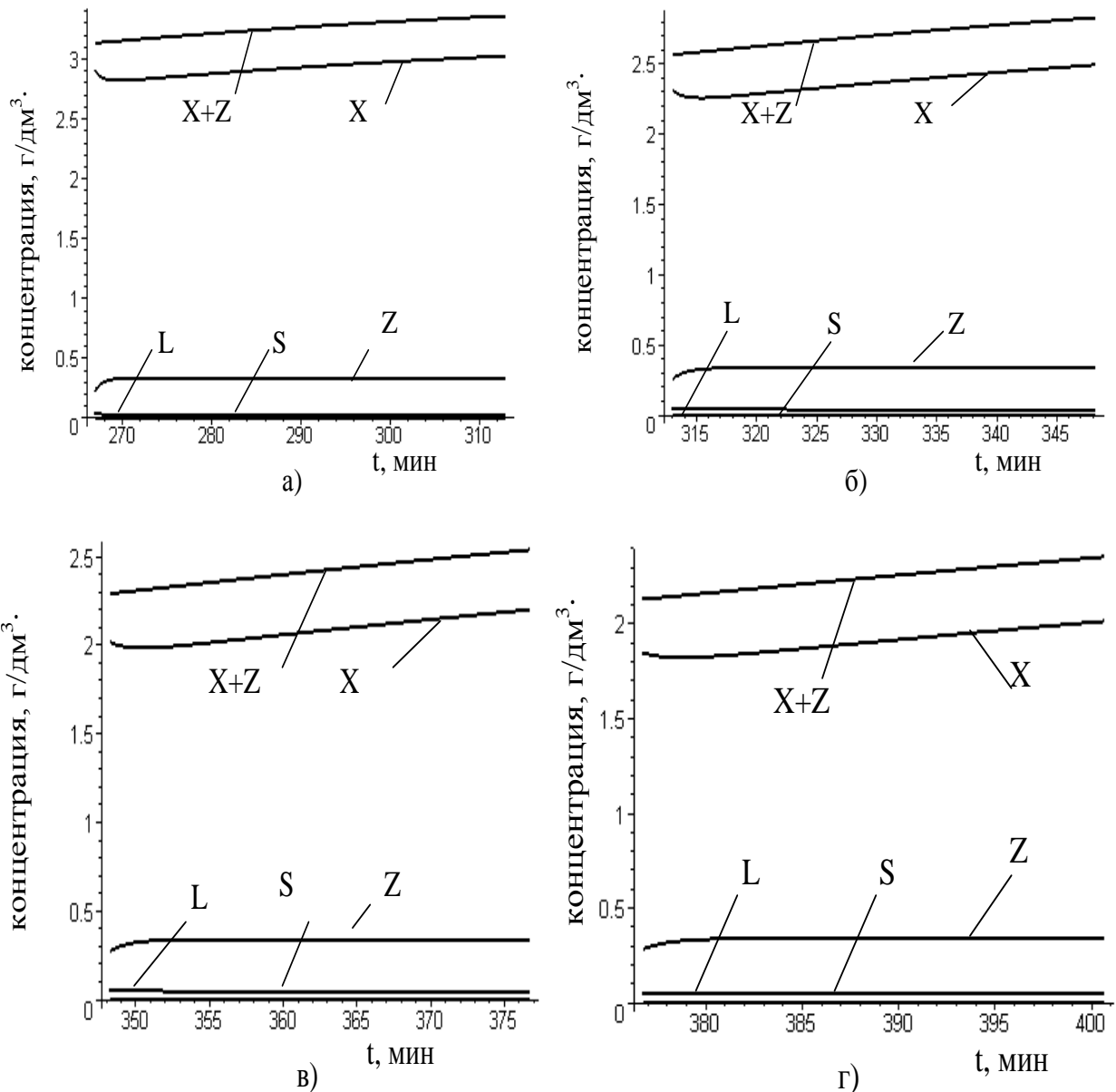


Рисунок 3.5 – Изменение концентраций хлопьев X , дисперсных бактерий Z , продуктов автолиза S и загрязнений L во второй фазе очистки: а) 1-й, б) 2-й, в) 3-й, г) 4-й выпуски сточных вод соответственно.

На выходе из третьей фазы (рис.3.6) получаем значения концентраций $X = 2,7$ г/дм³, $Z \geq 0$ г/дм³; $L \approx 0,015$ г/дм³.

Анализируя результаты расчета (рис.3.6) видим, что в третьей фазе происходит процесс хлопьеобразования, который обусловлен, как снижением влияния турбулентности (снижается интенсивность подачи воздуха в третий и четвертый коридоры аэротенка), так и преобладанием процесса агрегации отдельных дисперсных бактерий в хлопья.

Показано, что после прекращения процесса аэрации концентрация активного ила по массе практически не изменяется, это относится как к изменению концентрации дисперсных бактерий, так и к изменению концентрации хлопьев. Этот результат хорошо согласуется с изложенным в

разделе 2.3.4 тезисом о том, что в четвертой фазе, то есть во вторичном отстойнике происходит изменение концентрации ила по объему, а не по массе.

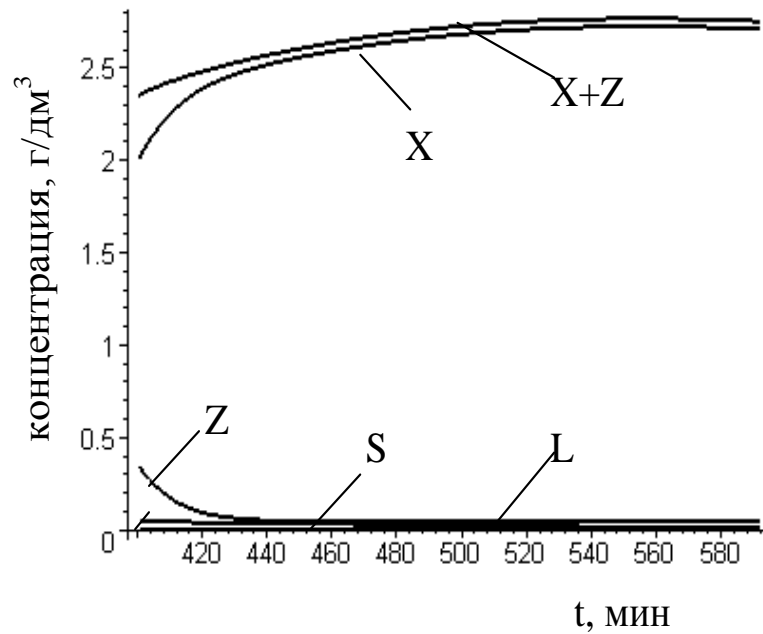


Рисунок 3.6 – Изменение концентраций хлопьев X , дисперсных бактерий Z , продуктов автолиза S и загрязнений L в третьей фазе очистки

На рис. 3.7 приведены результаты расчета для четвертой фазы очистки.

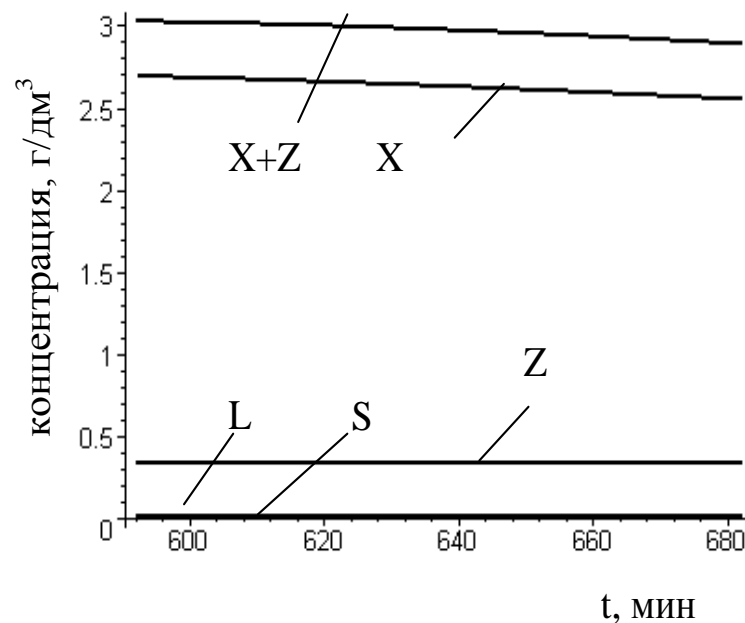


Рисунок 3.7 – Изменение концентраций хлопьев X , дисперсных бактерий Z , продуктов автолиза S и загрязнений L в четвертой фазе

Таким образом, предложенная модель (3.5)–(3.8) качественно описывает процесс биологической очистки сточных вод.

3.3 Анализ процессов, происходящих в аэротенке промежуточного типа в четырех фазах биологической очистки

Опираясь на результаты математического моделирования процесса биологической очистки в аэротенке с использованием модели (3.5)–(3.8), нами получены зависимости концентраций загрязнений (L), хлопьев (X), дисперсных бактерий (Z), продуктов автолиза (S) от времени протекания процессов биологической очистки в аэротенке для трех фаз (рис. 3.8-3.11).

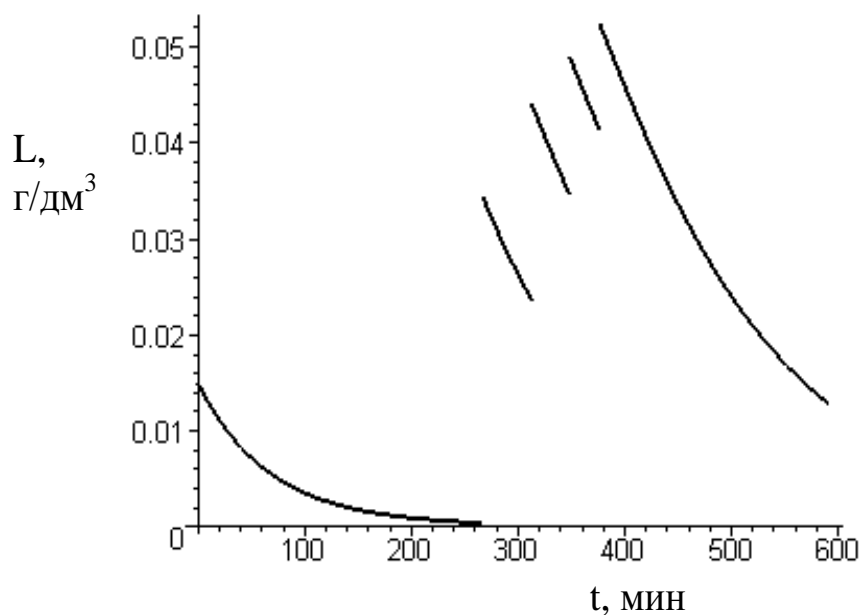


Рисунок 3.8 – Зависимость концентрации загрязнений (L) от времени протекания процесса очистки в аэротенке

Из рис. 3.8 видно, что в первой фазе биологической очистки в аэротенке происходит снижение концентрации загрязнений, поступивших с активным илом, что соответствует процессу доокисления трудноокисляемых загрязнений. Во второй фазе очистки происходит ступенчатое увеличение концентрации загрязнений, связанное с рассредоточенной подачей сточных вод. Соответственно, в третьей фазе очистки происходит снижение концентрации загрязнений за счет потребления их хлопьями и дисперсными бактериями.

Изменение суммарной концентрации компонентов возвратного ила хлопьев и дисперсных бактерий приведено на рис. 3.9. В первой фазе концентрация компонентов ила снижается приблизительно на 1,5-2 г/дм³. На выходе из второй фазы происходит достаточно резкое снижение концентрации компонентов ила. Такой результат объясняется взаимным разбавлением возвратного ила и сточной жидкости, поступающей на очистку. Кроме того происхо-

дит процесс возрастания концентрации активного ила в виде свободно плавающих (дисперсных) бактерий за счет диспергирования хлопьев.

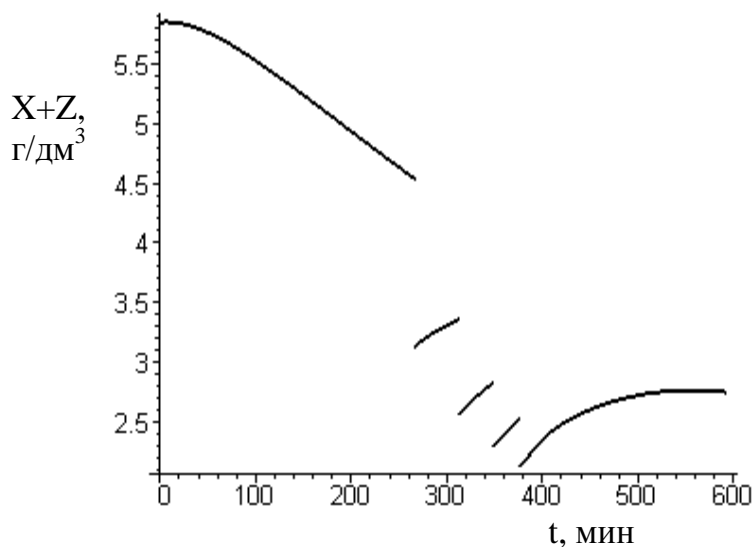


Рисунок 3.9 – Зависимость концентраций компонентов ила ($X + Z$) от времени протекания процесса для трех фаз очистки в аэротенке

Концентрация возвратного ила на выходе из четвертого коридора аэротенка составляет $X_{св.вых} = 2,84$ г/дм³, что сопоставимо с лабораторно контролируемыми значениями.

Изменение концентрации продуктов автолиза показано на рис. 3.10. Концентрация продуктов автолиза на выходе из первой фазы снижается практически до нуля (рис. 3.10), что объясняется тем, что в регенераторе происходит доокисление трудноокисляемых веществ.

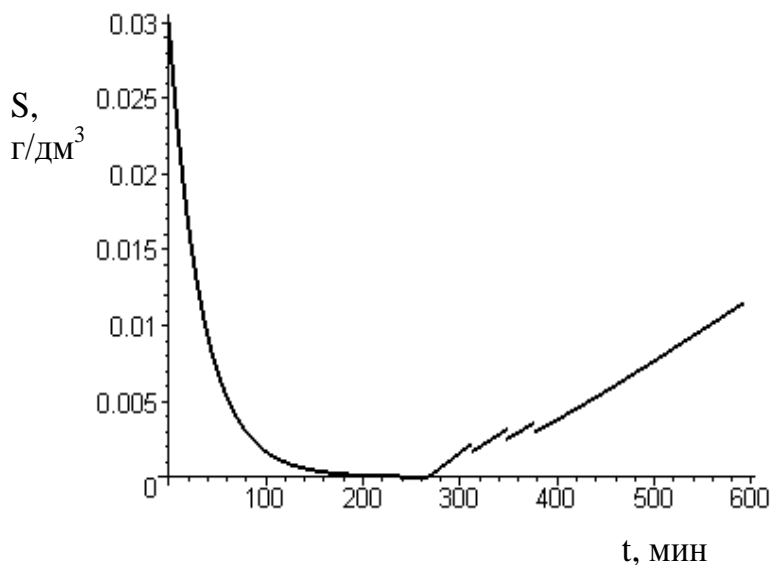


Рисунок 3.10 – Зависимость концентрации продуктов автолиза (S) от времени протекания процесса для трех фаз

На выходе из второй фазы концентрация продуктов автолиза возрастает. В третьей фазе очистки происходит накопление трудноокисляемой инертной массы загрязнений.

Результаты расчетов концентраций загрязнений на выходе из сооружений биологической очистки при различных начальных концентрациях загрязнений в поступающих на очистку сточных водах и изменяющемся расходе сточных вод приведены на рис. 3.11.

Анализируя результаты, приведенные на рис.3.11 видим, что концентрация загрязнений в очищенной воде после сооружений биологической очистки принимает наименьшие значения при наименьших значениях расхода сточных вод поступающих в аэротенк, и при наибольших концентрациях загрязнений в поступающих на очистку сточных водах. При увеличении расхода сточных вод, поступающих в аэротенк концентрация загрязнений в очищенной воде на выходе увеличивается.

Это объясняется тем, что от расхода сточных вод зависит время протекания процесса биологической очистки, то есть время контакта с активным илом. Кроме того, меньшее количество загрязнений в сточных водах, поступающих на очистку, не способствует приросту активного ила – основной составляющей процесса биологической очистки.

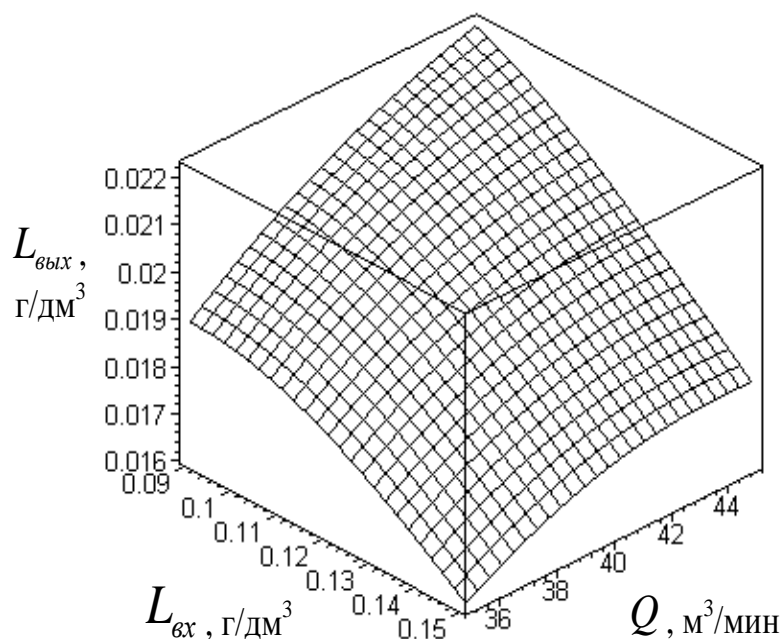


Рисунок 3.11 – Изменение концентрация загрязнений в очищенной воде ($L_{\text{вых}}$) после сооружений биологической очистки в зависимости от концентрации загрязнений в поступающих сточных водах L_{ex} и расхода сточных вод Q

Результаты численного решения системы уравнений (3.5)–(3.8) для получения концентрации активного ила при различных начальных значениях

концентрации загрязнений на входе в аэротенк и расхода сточных вод, поступающих на очистку, приведены на рис.3.12.

Из рисунка 3.12 видно, что минимальные значения концентрация активного ила принимает при наименьших значениях концентрации загрязнений в поступающих на очистку сточных водах. При этом увеличение концентрации загрязнений в сточных водах, поступающих в аэротенк, и увеличение расхода сточных вод приводит к увеличению концентрации активного ила на выходе из сооружений.

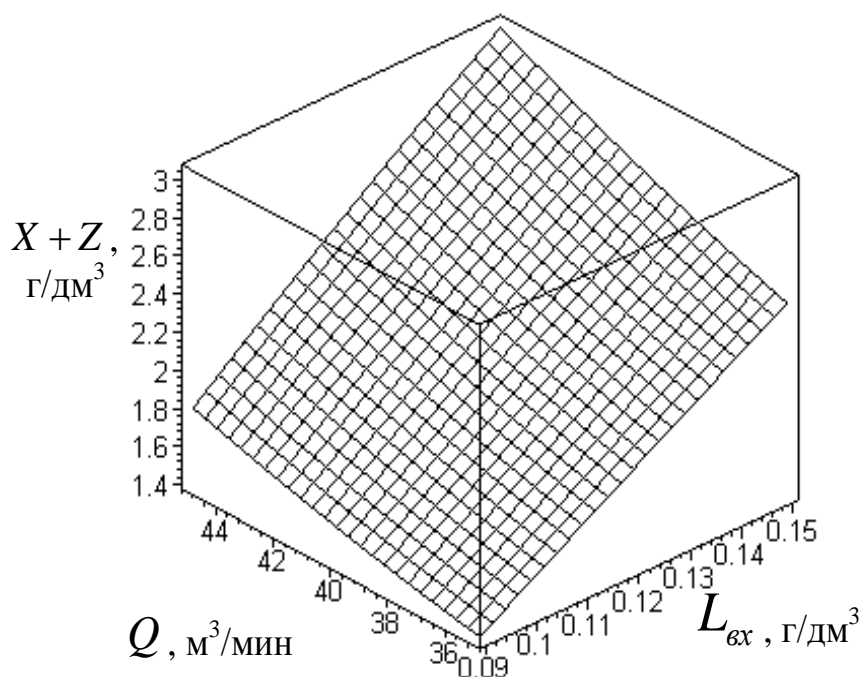


Рисунок 3.12 – Изменение концентрации активного ила ($X + Z$) в зависимости от концентрации загрязнений в поступающих стоках L_{ex} и расхода сточных вод Q

Необходимо отметить, что большее влияние на изменение концентрации ила на выходе из сооружений очистки оказывает концентрация загрязнений в поступающих на очистку сточных водах. Это связано с тем, что именно загрязнения, содержащиеся в загрязнениях, в поступающих на очистку сточных водах, являются источником прироста активного ила.

3.4 Анализ результатов численных расчетов концентраций загрязнений и составляющих активного ила, полученных в результате использования разных моделей

Из сравнения результатов численных расчетов концентраций, представленных на рис. 3.1-3.3 и 3.4-3.6, видно, что результаты расчетов по системам уравнений (3.1)–(3.4) и (3.5)–(3.8) начинают существенно отличаться со второй фазы. Кроме того, на всех этапах второй фазы (рис. 3.5 а-г) при использо-

вании системы уравнений (3.5)–(3.8) получено сначала уменьшение концентрации хлопьев, а затем ее возрастание. При этом сравнивая результат, полученный с использованием модели (3.1)–(3.4), в конце второй фазы видим, что при решении этой системы наблюдается значительное превышение концентрации дисперсных бактерий по сравнению с концентрацией хлопьев при этом концентрация хлопьев все время убывает. При использовании системы уравнений (3.5)–(3.8) значения этих концентраций примерно одинаковы (рис. 3.5 г), при этом концентрация хлопьев имеет тенденцию к возрастанию. Особенно значительно отличие в описании моделями (3.1)–(3.4) и (3.5)–(3.8) процессов в третьей фазе, где предложенная модель (3.5)–(3.8) показывает почти полную агрегацию дисперсных бактерий в хлопья ила так, что возрастание концентрации ила идет, в основном, за счет увеличения концентрации хлопьев. Такой результат хорошо согласуется с процессами, происходящими в реальных аэротенках.

Отметим, что модель (3.1)–(3.4) можно согласовать с моделью (3.5)–(3.8) для идеальных аэротенков–смесителей при таких значениях $a_x = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$, $b_x = 9,9 \cdot 10^{-2} \text{ дм}^3 \cdot (\text{г} \cdot \text{мин})^{-1}$, $a_z = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$, $b_z = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ дм}^3 \cdot (\text{г} \cdot \text{мин})^{-1}$, $g_x = g_z = 1,08 \cdot 10^{-1} \text{ дм}^3 \cdot (\text{г} \cdot \text{мин})^{-1}$. Зависимости концентраций, полученные в результате решения уравнений (3.1) – (3.4) и (3.5) – (3.8) с учетом только X и L при $k_1 = k_2 = 0$ (идеальный аэротенк – смеситель) показаны на рис. 3.14.

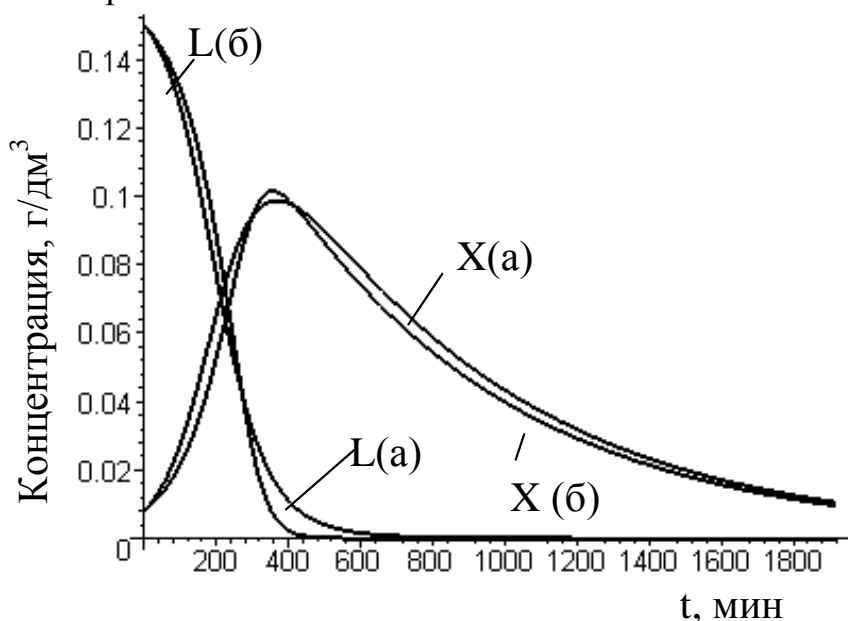


Рисунок 3.14 – Зависимости изменения концентраций хлопьев X и загрязнений L :

а) для модели (3.5)–(3.8);
б) для модели (3.1)–(3.4).

Таким образом, уравнения (3.5)–(3.8) могут описывать также и процессы, происходящие в аэротенках идеального типа. Проведенные нами исследования показали, что модель (3.5)–(3.8) при значениях параметров соответствующих результатам, приведенным на рис. 3.4–3.6, можно для идеального аэротенка согласовать с моделью (3.1)–(3.4) при таких значениях $\mu = 3,5 \cdot 10^{-1} \text{ мин}^{-1}$, $K_L = 4,77 \text{ г} \cdot (\text{дм}^3)^{-1}$, $Y = 27$, $\beta = 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$.

Решая тогда систему уравнений (3.1)–(3.4) при прежних значениях остальных параметров, получаем результаты, которые представлены на рис. 3.15-3.17.

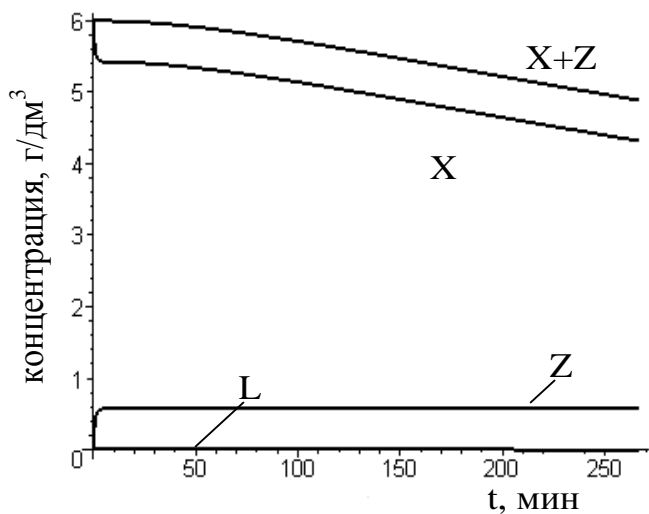


Рисунок 3.15 – Изменение концентраций хлопьев X , дисперсных бактерий Z и загрязнений L в первой фазе очистки

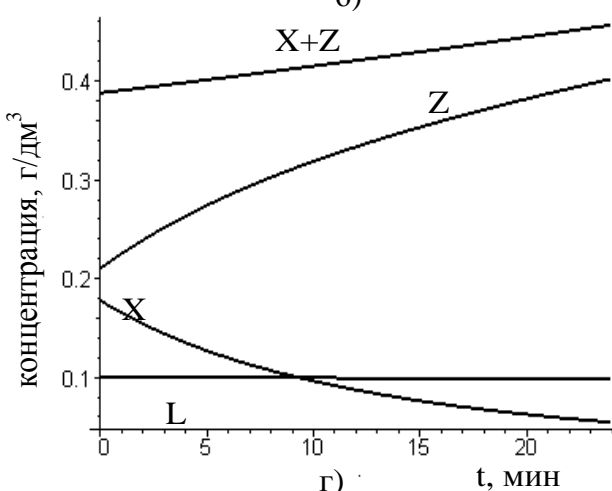
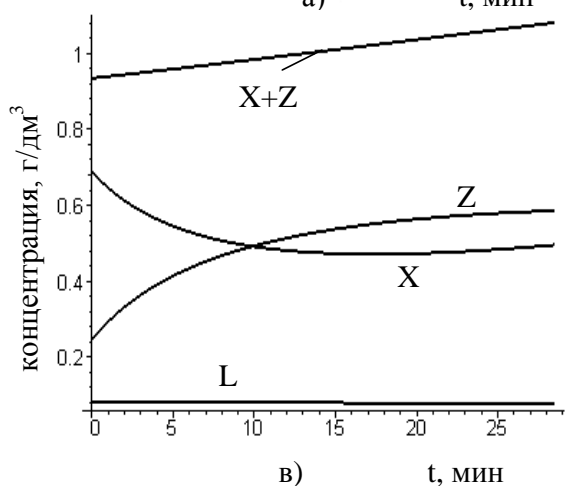
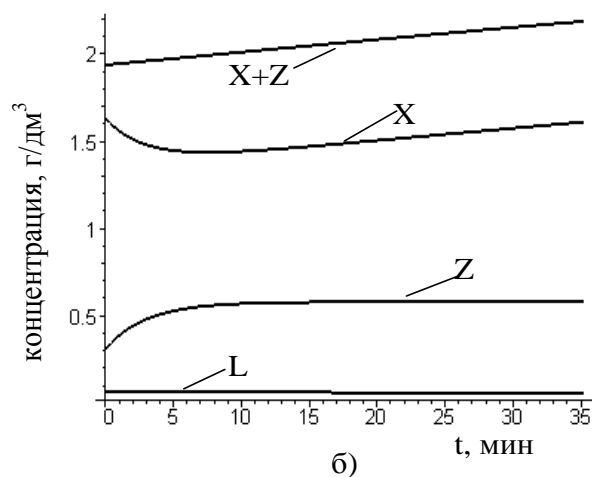
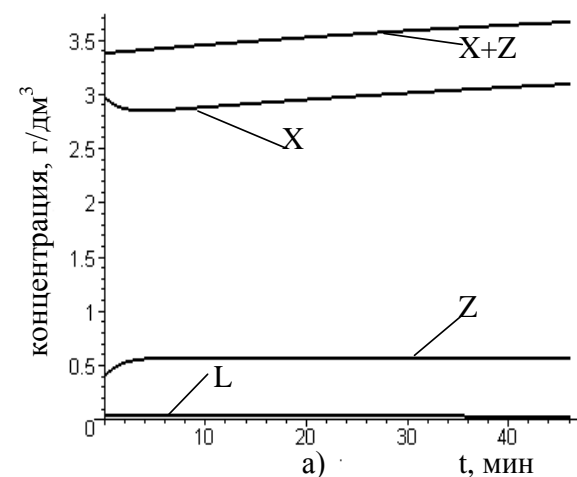


Рисунок 3.16 – Изменение концентраций хлопьев X , дисперсных бактерий Z и загрязнений L во второй фазе очистки а)–г) 1-й, 2-й, 3-й и 4-й выпуски сточных вод соответственно

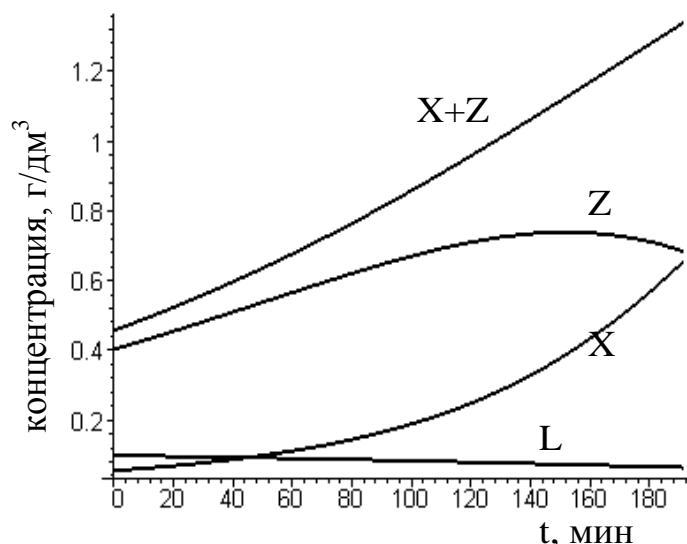


Рисунок 3.17 – Изменение концентраций хлопьев X , дисперсных бактерий Z и загрязнений L в третьей фазе очистки

Результаты таких расчетов показывают, что зависимости концентраций загрязнений, хлопьев и дисперсных бактерий от времени принципиально не отличаются между собой для процессов, протекающих в первой фазе очистки (рис. 3.1 и рис. 3.4) и в начале второй фазы (рис. 3.5 а-б и рис.3.16 а-б), то есть в первой подфазе второй фазы очистки.

Отличия в концентрациях возникают, начиная с середины второй фазы. При этом решение системы уравнений (3.1)–(3.4) снова показывает значительное уменьшение концентрации хлопьев на выходе из второго коридора аэротенка (рис. 3.16 в-г).

Получаем, как и на рис. 3.3 - в, что концентрация дисперсных бактерий значительно превышает концентрацию хлопьев.

В результате на выходе из третьей фазы концентрации хлопьев и дисперсных бактерий $X = Z = 0,6 \text{ г/дм}^3$ (рис. 3.17) имеют практически одинаковые значения, а концентрация субстрата $L = 0,08 \text{ г/дм}^3$. Указанные значения концентраций на выходе из аэротенка существенно отличаются от измеряемых лабораторно значений: $X_{\text{э}} = 3 - 4 \text{ г} \cdot (\text{дм}^3)^{-1}$, $Z_{\text{э}} \geq 0 \text{ г} \cdot (\text{дм}^3)^{-1}$, $L_{\text{э}} \approx 0,015 \text{ г} \cdot (\text{дм}^3)^{-1}$.

Значения концентраций X и L , получаемые при решении системы уравнений (3.1)–(3.4) или (3.5)–(3.8) являются начальными условиями для описания процессов в четвертой фазе очистки (вторичный отстойник), где должно происходить оседание хлопьев активного ила в процессе отстаивания. На выходе из аэротенка количество дисперсных бактерий должно быть минимальным, чтобы не допустить выноса ила из сооружений. Проведенное нами исследование показывает, что модель, предназначенная для описания процессов в идеальных аэротенках и обобщенная для аэротенка промежуточного типа в виде уравнений (3.1)–(3.4), приводит к неудовлетворительным результатам. Поэтому для дальнейших исследований явлений в аэротенке промежу-

точного типа будет использована предложенная нами модель в виде уравнений (3.5)–(3.8).

Выводы к разделу 3

1. На основе выявленных закономерностей дальнейшее развитие получила математическая модель процесса биологической очистки (3.5)–(3.8) в системе «аэротенк – вторичный отстойник», учитывающая влияние характеристик активного ила и сточных вод, поступающих на очистку, и отличающаяся разделением процесса биологической очистки на четыре фазы, что позволяет учесть конструктивные особенности сооружений биологической очистки.

2. При решении системы дифференциальных уравнений (3.5)–(3.8) получена количественная оценка концентраций хлопьев, дисперсных бактерий и загрязнений, соответствующих действующим сооружениям.

3. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования. Показано, что предложенная модель процесса биологической очистки сточных вод в аэротенке промежуточного типа с регенератором (3.5)–(3.8) качественно описывает процесс биологической очистки сточных вод в аэротенке.

РАЗДЕЛ 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

4.1 Описание методики проведения эксперимента по исследованию процесса биологической очистки сточных вод

Для исследования процесса биологической очистки сточных вод были определены основные факторы, влияющие на протекание процесса, и проведены замеры концентраций БПК₅, дозы ила в точках 1, 2, 3 и 4 (рис.4.1).

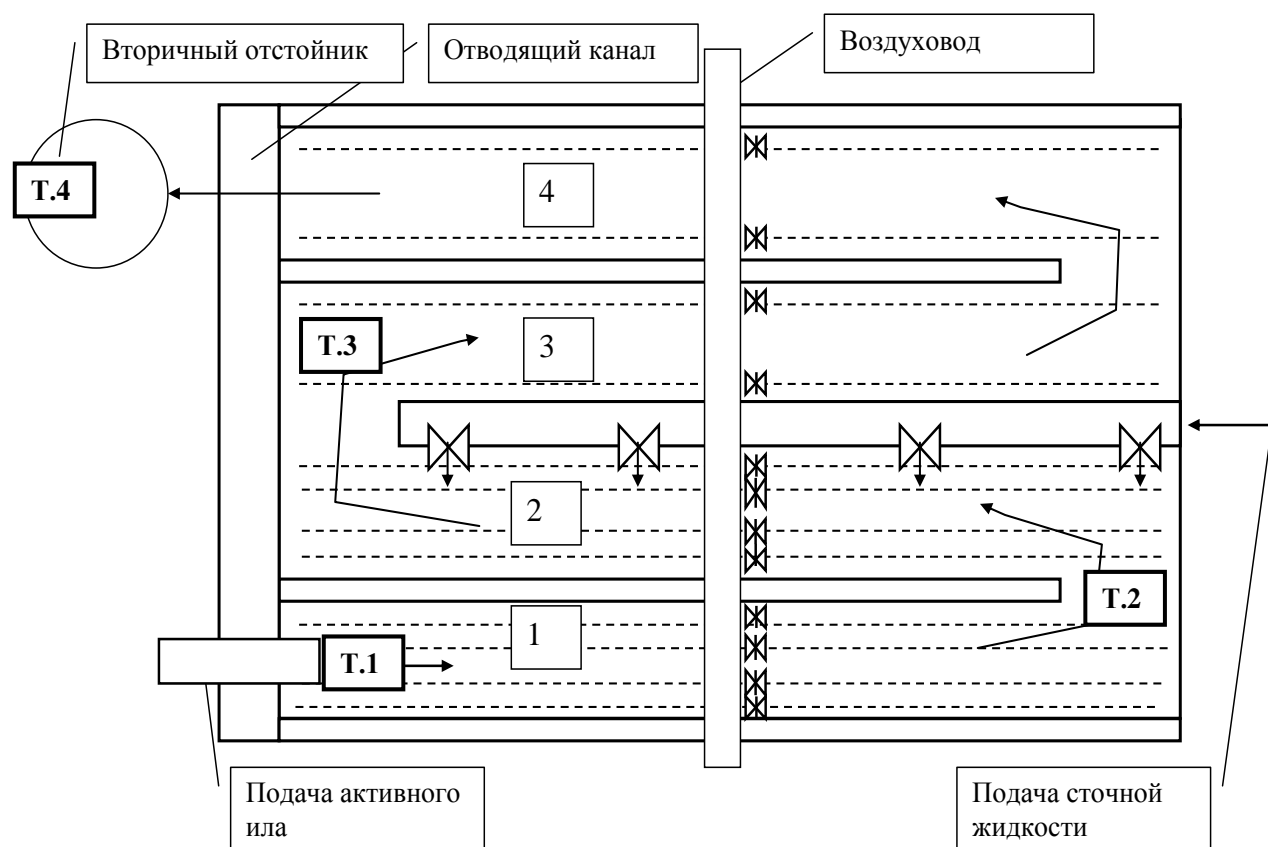


Рисунок 4.1 – Схема сечения четырехкоридорного аэротенка с расположением точек отбора проб:

1 – регенератор (первый коридор) аэротенка, 2 – второй коридор аэротенка, 3 – третий коридор аэротенка, 4 – четвертый коридор аэротенка

Данные точки были выбраны согласно описанию процессов биологической очистки, предложенному во втором разделе и разбиению процесса биологической очистки на четыре фазы:

точка 1 – начало первой фазы биологической очистки, начало первого коридора (регенератора), подача активного ила (рис.4.2);

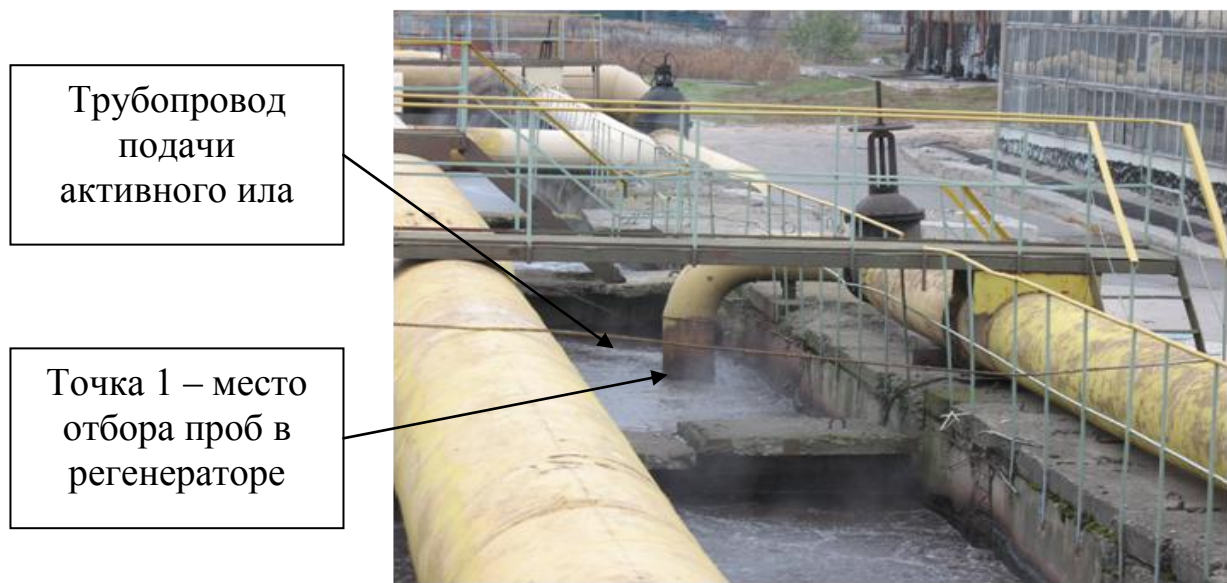


Рисунок 4.2 – Аэротенк 3 секция №2 первый коридор (регенератор)

точка 2 – конец первого коридора (регенератора), конец первой фазы биологической очистки, происходит подача первой порции сточных вод (Рисунок 4.3);

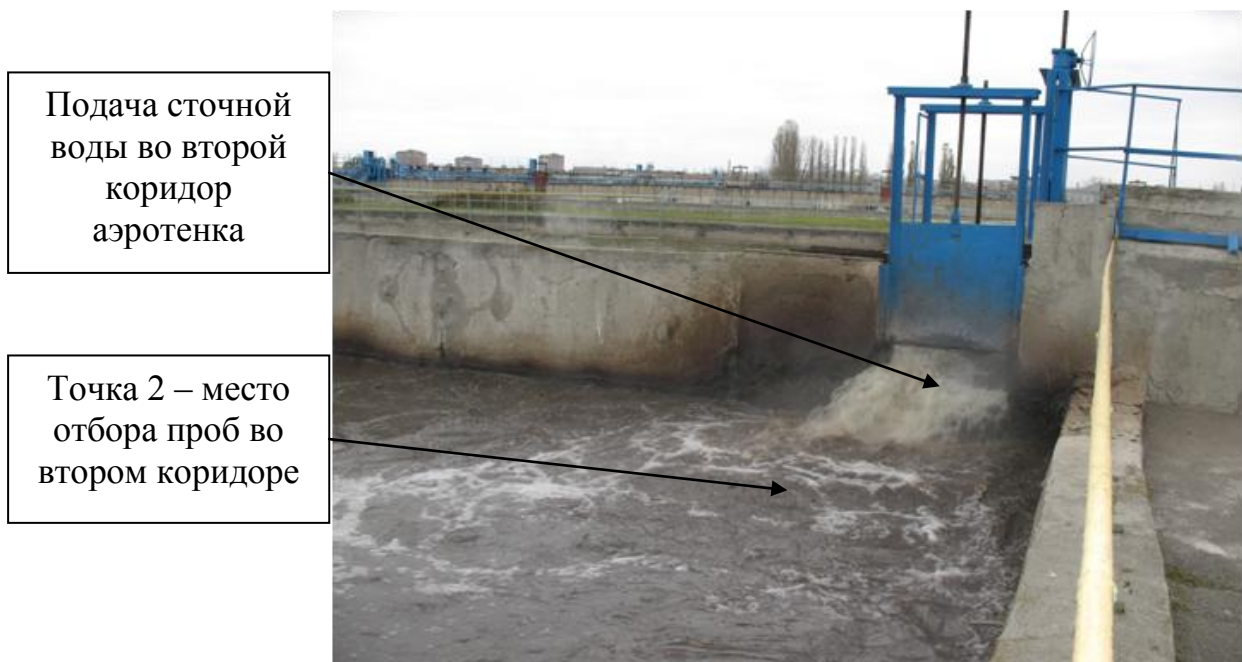


Рисунок 4.3 – Аэротенк 3 секция №2 второй коридор

точка 3 – начало третьего коридора аэротенка, конец второй фазы биологической очистки, происходит подача четвертой порции сточных вод (рис. 4.4);

Начало третьего
коридора аэротенка

Точка 3 – место
отбора проб
в аэротенке



Рисунок 4.4 – Аэротенк 3 секция №2 третий коридор

точка 4 – конец четвертой фазы биологической очистки, очищенная вода собирается в сборный лоток вторичного отстойника и движется в отводящий канал (рис. 4.5).

Отводящий канал

Точка 4 – место отбора проб в отводящем лотке вторичного отстойника



Рисунок 4.5 – Вторичный отстойник

Определение БПК₅ производилось в аттестованной лаборатории по стандартной методике с разбавлением по разности содержания кислорода до

и после инкубации в стандартных условиях: при температуре 20 °С, без доступа воздуха и света [76, 77]. Измерения производились при помощи кислородомера MP 525 рН/DO Meter (ULAB). Для пересчета БПК₅ в БПК_{полн} использовался коэффициент 1,33.

Определение концентрации активного ила по массе (дозы ила по массе) проводилось в аттестованной лаборатории по стандартной методике с фильтрованием определенного объема иловой смеси с последующим высушиванием и взвешиванием осадка. Стандартные методики определения концентрации БПК₅ и дозы ила использовались при определении указанных параметров в ходе выполнения экспериментальных исследований.

4.2 Экспериментально–расчетное исследование процесса биологической очистки сточных вод в системе «аэротенк – вторичный отстойник»

Предложенная в разделе 3 модель процесса биологической очистки сточных вод в аэротенке промежуточного типа с регенератором (3.5)–(3.8) позволяет связать характеристики сточных вод, поступающих на очистку в аэротенк, расход сточных вод, определить концентрацию загрязнений в очищенных водах после аэротенка, а также концентрацию составляющих активного ила – хлопьев и дисперсных бактерий.

Для исследования процессов биологической очистки сточных вод в аэротенке промежуточного типа с регенератором и установления адекватности результатов, полученных по предложенной математической модели (3.5)–(3.8) процесса биологической очистки сточных вод в аэротенке промежуточного типа, нами были проведены экспериментальные исследования на комплексе биологической очистки «Диканевский» г. Харьков на аэротенке № 3 секция 2. При подготовке к эксперименту использовались методы теории планирования эксперимента.

4.2.1 Исследование процесса биологической очистки сточных вод в первой фазе очистки

Анализ модели (3.5)–(3.8) в регенераторе аэротенка (фаза 1) показал, что для определения дозы ила по массе на выходе из первого коридора аэротенка, необходимо знать значения расхода активного ила, подаваемого на регенерацию, а также концентрацию возвратного ила.

Из анализа данных лабораторных исследований по указанным параметрам определены пределы варьирования факторов, оказывающих влияние на изменение концентрации активного ила на выходе из первого коридора аэротенка, их значения приведены в табл. 4.1.

При проведении эксперимента используется полиномиальная зависимость второго порядка [119-125], центральный, композиционный, рототабельный униформ–план.

Для определения коэффициентов при квадратичных членах информации, полученной при использовании план–матрицы полного факторного эксперимента (ПФЭ), недостаточно. Необходимую информацию получают в звездных точках. При этом в двухуровневом эксперименте для трех факторов звездное плечо $\alpha=1,000$ [119].

Таблица 4.1 – Уровни варьирования факторов

Интервал варьирования и уровень факторов	Расход активного ила, $\text{м}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$	Доза ила, подаваемого в регенератор, по массе, $\text{г} \cdot (\text{дм}^3)^{-1}$
Нулевой уровень $x_i=0$	25,18	4,5
Интервал варьирования δ_i	2	1,5
Нижний уровень $x_i=-1$	23,18	3,0
Верхний уровень $x_i=+1$	27,18	6,0
Звездные точки: $x_i=+2$	27,18	6,0
$x_i=-2$	23,18	1,5
Кодовое обозначение	x_1	x_2

Количество наблюдений в центре плана n_0 определяется по рекомендациям, изложенным в [119-125], общее число опытов N составляет:

$$N = 2^k + 2k + n_0, \quad (4.2)$$

где k – количество факторов.

Тогда для двухфакторного эксперимента при $k=2$, а $n_0=1$, общее число опытов $N=9$.

Связь между кодовым и натуральным выражением фактора задается формулой:

$$x_i = \frac{X_i - x_{i0}}{\delta_i}, \quad (4.3)$$

где X_i – натуральное значение фактора;

x_{i0} – значение i -того фактора на нулевом уровне;

δ_i – интервал варьирования i -того фактора.

На первом этапе необходимо провести кодирование переменных, которое производится по стандартным зависимостям [119], строится план – матрица эксперимента (табл.4.2).

Результаты, полученные после определения дозы ила во второй секции аэротенка №3 в точке 2, приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.2 – План – матрица эксперимента

Опыт	№	Расход активного ила, поступающего в регенератор, м ³ ·мин ⁻¹	Концентрация хлопьев в активном иле, подаваемом в регенератор, г·(дм ³) ⁻¹
Планирование типа 2 ²	1	27,18	6,0
	2	27,18	3,0
	3	23,18	6,0
	4	23,18	3,0
Центр плана	5	25,18	4,5
Звездные точки	6	27,18	4,5
	7	23,18	4,5
	8	25,18	6,0
	9	25,18	3,0

Таблица 4.3 – Результаты экспериментальных измерений

Опыт	№	Доза ила на выходе из регенератора у ₁ , г·(дм ³) ⁻¹
Планирование типа 2 ²	1	4,63
	2	2,61
	3	4,48
	4	2,37
Центр плана	5	3,61
Звездные точки	6	3,62
	7	3,48
	8	4,68
	9	2,50

Для проверки значимости квадратичных эффектов предложенной модели по результатам моделирования в точках плана 2² определяется оценка b₀ [119-125], т.е.:

$$b_0 = \frac{1}{2^k} \sum_{u=1}^{2^k} y_u, \quad (4.4)$$

где u – номер опыта;

y – результат соответствующего опыта.

Также определяется среднее значение наблюдений в центре плана \bar{y}_0 [119-125]:

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{u=N-n_0}^N y_u. \quad (4.5)$$

Оценка дисперсии ошибок наблюдений s_E^2 определяется по результатам $n_0=1$ параллельных опытов в центре плана. Она равна отношению суммы квадратов невязки в центре плана и числа степеней свободы $f_E = 3$ [119-123]:

$$s_E^2 = \frac{1}{(n_0 - 1)_{u = N - n_0}} \sum_{u=1}^N (y_u - \bar{y}_0)^2. \quad (4.6)$$

Критическое значение критерия Стьюдента $t_{\tilde{n}, \hat{\epsilon}, \delta}$ для числа степеней свободы $f_E = 3$ при уровне значимости 5% равно 3,18 [119].

Проверка гипотезы о значимости квадратичных членов в модели осуществляется на основании соотношения:

$$|\bar{y}_0 - b_0| > t_{s\text{кр}} \cdot s_E^2 \sqrt{\frac{n_0 + N}{n \cdot N}}. \quad (4.7)$$

Для данного эксперимента результаты приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты проверки гипотезы о значимости квадратичных членов модели

Зависимость	Значение
b_0	3,52
\bar{y}_0	3,61
$ \bar{y}_0 - b_0 $	0,09
s_E^2	$1,81 \cdot 10^{-3}$
$t_{s\text{кр}} \cdot s_E^2 \sqrt{\frac{n_0 + N}{n \cdot N}}$	$3,03 \cdot 10^{-3}$

Очевидно, неравенство (4.7) выполняется, т.е. эффекты при квадратичных членах модели являются значимыми. Однако эта оценка не является абсолютной, так как возможен вариант, при котором сумма положительных коэффициентов при квадратичных членах равна (или близка) сумме отрицательных [119].

Коэффициенты модели определяются в соответствии с выражениями [119-123].

$$b_0 = \frac{A}{N} \left(2 \cdot \lambda^2 (k+2) \sum_{u=1}^N y_u - 2 \cdot \lambda \cdot C \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u \right); \quad (4.8)$$

$$b_i = \frac{C}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u; \quad i = \overline{1, k}; \quad (4.9)$$

$$b_{ij} = \frac{C^2}{N \cdot \lambda} \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u; \quad i, j = \overline{1, k}; \quad i < j; \quad (4.10)$$

$$b_{ii} = \frac{A}{N} \left[C^2 ((k+2) \cdot \lambda - k) \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u + \right. \\ \left. + C^2 (1 - \lambda) \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - 2 \cdot \lambda \cdot C \sum_{u=1}^N y_u \right], \quad i = \overline{1, k} \quad (4.11)$$

где приняты обозначения:

$$\lambda = \frac{k \cdot N}{(k+2) \cdot (N - n_0)}; \quad (4.12)$$

$$A = \frac{k \cdot N}{2\lambda((k+2) \cdot \lambda - k)}; \quad (4.13)$$

$$C = \frac{N}{2^k + 2 \cdot \alpha^2}. \quad (4.14)$$

При $k=2$, $n_0=1$, $\alpha=1.000$ (звездное плечо) были получены следующие значения коэффициентов (табл. 4.5).

Таблица 4.5 – Значения коэффициентов модели

Коэффициент	Значение
b_0	3,61333
b_1	0,08833
b_2	1,05167
b_{11}	-0,065
b_{22}	-0,025
b_{12}	-0,0225

Тогда уравнение регрессии принимает вид:

$$y_1 = 3.61333 + 0.08833x_1 + 1.05167x_2 - 0.065x_1^2 - 0.025x_2^2 - 0.0225. \quad (4.15)$$

Проверка адекватности полученного уравнения (4.15) осуществляется по критерию Фишера. Значение критерия Фишера (F), рассчитанное по формуле (4.16), не должно превышать его критического значения ($F_{кр}$) [119]:

$$F = \frac{s_{ад}^2}{s_E^2}, \quad (4.16)$$

где $s_{ад}^2$ – дисперсия адекватности, определяемая по формуле:

$$s_{ад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (y_u - y_{mu})^2 - \sum_{u=N-f_E}^N (y_u - \bar{y}_0)^2}{f_{ад}}, \quad (4.17)$$

где $f_{ад}$ – число степеней свободы.

С учетом (4.16-4.17), были определены дисперсии адекватности и значения критерия Фишера (табл. 4.6).

Таблица 4.6 – Результаты расчета дисперсии адекватности и критерия Фишера

Показатель	Критерий
Дисперсия адекватности	$5,4417 \cdot 10^{-3}$
Критерий Фишера F	3,0
$F_{кр}$	10,128

Очевидно, что условие $F < F_{кр}$ выполняется, следовательно, уравнение (4.15) является адекватным реальным процессам в рамках принятых условий и допущений.

С целью проверки значимости коэффициентов уравнения (4.15), получены статистические оценки дисперсии коэффициентов по формулам [119-123]:

$$s_0^2 = \frac{2 \cdot A \cdot \lambda \cdot (k+2)}{N} s_E^2; \quad (4.18)$$

$$s_i^2 = \frac{C}{N} s_E^2; \quad i = \overline{1, k}; \quad (4.19)$$

$$s_{ij}^2 = \frac{C^2}{\lambda \cdot N} s_E^2; \quad i, j = \overline{1, k}; \quad i < j; \quad (4.20)$$

$$s_{ii}^2 = \frac{A \cdot ((k+1) \cdot \lambda - (k+2)) \cdot C^2}{N} s_E^2; \quad i = \overline{1, k}. \quad (4.21)$$

Коэффициент уравнения считается значимым, если выполняется следующее соотношение:

$$|b_i| > t_{с.кр} \cdot s_i^2, \quad (4.22)$$

где b_i – значение коэффициента модели;

s_i^2 – соответствующая оценка дисперсии коэффициента.

Критическое значение критерия Стьюдента $t_{с.кр}$ для числа степеней свободы $f_E = 3$ при уровне значимости 5% равно 3,18 [119].

Вычисления по формулам (4.18) – (4.21) приводят к следующим оценкам (табл. 4.7). Для всех оценок коэффициентов уравнения (4.15) неравенство (4.22) выполняется. Следовательно, уравнение имеет вид, представленный выражением (4.15). Таким образом, все параметры, входящие в уравнение (4.15) оказывают влияние на протекание процесса в первой фазе аэротенка промежуточного типа с регенератором.

Таблица 4.7 – Оценка значимости коэффициентов регрессии

Коэффициент	s_i^2	$t_{с.кр} \cdot s_i^2$	Вывод
b_0	$1,0077 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	Значим
b_1	$3,0231 \cdot 10^{-4}$	$9,6134 \cdot 10^{-4}$	Значим
b_2	$3,0231 \cdot 10^{-4}$	$9,6134 \cdot 10^{-4}$	Значим
b_{11}	$9,0694 \cdot 10^{-4}$	$2,884 \cdot 10^{-5}$	Значим
b_{22}	$9,0694 \cdot 10^{-4}$	$2,884 \cdot 10^{-5}$	Значим
b_{12}	$4,5347 \cdot 10^{-4}$	$1,442 \cdot 10^{-5}$	Значим

Для уравнения (4.15) нами получено численное решение (рис.4.11) которое позволяет установить зависимость концентрации ила по сухому веществу от расхода возвратного ила, подаваемого в регенератор аэротенка, и от дозы ила, поступающего на регенерацию.

Анализируя полученные результаты видим, что наибольшее влияние на изменение концентрации ила на выходе из регенератора оказывает концентрация ила (x_2) поступающего в регенератор (рис. 4.11).

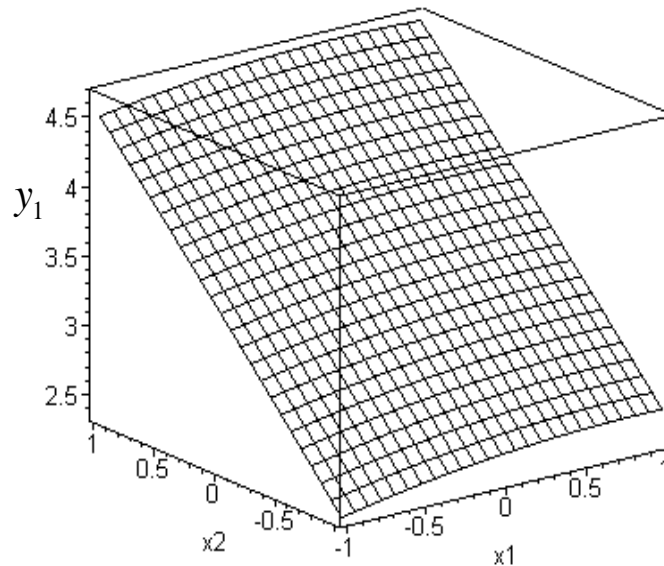


Рисунок 4.11 – Зависимость изменения дозы ила Y_1 в регенераторе аэротенка от дозы ила (x_2), поступающего в регенератор, и его расхода (x_1)

При увеличении расхода ила (x_1), поступающего в регенератор, изменение дозы ила на выходе из первого коридора происходят в пределах $0,1 \div 0,2$ г/дм³. При этом увеличение концентрации активного ила, поступающего на регенерацию, приводит к изменению дозы ила на выходе в пределах 2-х г/дм³.

4.2.2 Исследование процесса биологической очистки сточных вод во втором–четвертом коридорах аэротенка и вторичном отстойнике

Для определения концентрации загрязнений в очищенной воде на выходе из сооружений биологической очистки, необходимо знать значения концентрации загрязнений в сточных водах по БПК₅, расход сточных вод, а также концентрацию компонентов активного ила – хлопьев и дисперсных бактерий. Нами предлагается совместное исследование процессов, протекающих в фазах 2, 3 и 4, так как управлять параметрами, влияющими на протекание процесса биологической очистки в фазе 3, можем только в начале фазы 2, а концентрация загрязнений на выходе из сооружений биологической очистки (после фазы 4) напрямую зависит от протекания процесса в фазе 3.

Из анализа данных лабораторных исследований по указанным параметрам определены пределы варьирования факторов, оказывающих влияние на изменения концентрации загрязнений в очищенных водах на выходе из сооружений биологической очистки после смешения активного ила и поступающих на очистку сточных вод, их значения приведены в табл. 4.8.

При проведении эксперимента используется полиномиальная зависимость второго порядка [119-124], центральный, композиционный, рототабельный униформ–план.

Таблица 4.8 – Уровни варьирования факторов

Интервал варьирования и уровень факторов	Расход сточных вод, м ³ /мин	Концентрация загрязнений в сточных водах, г/л	Доза ила, г/л
Нулевой уровень $x_i=0$	40	0,120	4,5
Интервал варьирования δ_i	5	0,030	1,5
Нижний уровень $x_i=-1$	35	0,09	3,0
Верхний уровень $x_i=+1$	45	0,150	6,0
Звездные точки: $x_i=+2$ $x_i=-2$	46,07	0,15	6,32
	33,9	0,08	2,67
Кодовое обозначение	x_3	x_4	x_5

Для определения коэффициентов при квадратичных членах информации, полученной при использовании план–матрицы полного факторного эксперимента, недостаточно. Необходимую информацию получают в звездных точках. При этом в двухуровневом эксперименте для трех факторов звездное плечо $\alpha=1,215$ [119].

Количество наблюдений в центре плана n_0 определяется по формуле (4.2), общее число опытов $N=15$, если $k=3$, $n_0=1$.

Связь между кодовым и натуральным выражением фактора задается формулой (4.3).

На первом этапе производится кодирование переменных, которое производится по стандартным зависимостям [119], строится план – матрица эксперимента (табл. 4.9).

Таблица 4.9 – План – матрица эксперимента

Опыт	№	Расход сточных вод, м ³ ·мин ⁻¹	Концентрация загрязнений в сточных водах, г·(дм ³) ⁻¹	Доза ила, г·(дм ³) ⁻¹
Планирование типа 2 ³	1	45	0,15	6
	2	45	0,15	3
	3	45	0,09	6
	4	45	0,09	3
	5	35	0,15	6
	6	35	0,15	3
	7	35	0,09	6
	8	35	0,09	3
Центр плана	9	40	0,120	4,5
Звездные точки	10	46,07	0,120	4,5
	11	33,90	0,120	4,5
	12	40	0,15	4,5
	13	40	0,08	4,5
	14	40	0,12	6,32
	15	40	0,12	2,67

Результаты, полученные в результате измерения концентрации загрязнений в очищенной воде в точке 4 (рис.4.1) после полуторачасового отстаивания, приведены в табл. 4.10.

Для проверки значимости квадратичных эффектов предложенной модели по результатам моделирования в точках плана 2^3 определяется оценка b_0 [119-123] по формуле (4.4). Также определяется среднее значение наблюдений в центре плана \bar{y}_0 [119-123] (формула 4.5).

Оценка дисперсии ошибок наблюдений s_E^2 определяется по результатам $n_0=1$ параллельных опытов в центре плана (4.6), равна отношению суммы квадратов невязки в центре плана и числа степеней свободы $f_E = 5$ [119-123].

Критическое значение критерия Стьюдента $t_{c,кр}$ для числа степеней свободы $f_E = 5$ при уровне значимости 5% равно 2,57 [119].

Таблица 4.10 – Результаты экспериментальных измерений

Опыт	№	Концентрация загрязнений, г/л
		y_2
Планирование типа 2^3	1	0,0163
	2	0,01510
	3	0,0210
	4	0,0219
	5	0,0113
	6	0,0116
	7	0,0149
	8	0,0173
Центр плана	9	0,0169
Звездные точки	10	0,020
	11	0,0144
	12	0,0130
	13	0,0210
	14	0,0168
	15	0,01710

Проверка гипотезы о значимости квадратичных членов в модели осуществляется на основании соотношения (4.7).

Для данного эксперимента результаты приведены в табл. 4.11.

Очевидно, неравенство (4.6) выполняется, т.е. эффекты при квадратичных членах модели являются значимыми. Однако эта оценка не является абсолютной, так как возможен вариант, при котором сумма положительных коэффициентов при квадратичных членах равна (или близка) сумме отрицательных [119].

Таблица 4.11 – Результаты проверки гипотезы о значимости квадратичных членов

Зависимость	Значение
b_0	0,0161
$\overline{y_0}$	0,01668
$ \overline{y_0} - b_0 $	0,00058
s_E^2	$3,36 \cdot 10^{-7}$
$t_{с\text{кр}} \cdot s_E^2 \sqrt{\frac{n_0 + N}{n \cdot N}}$	$3,99 \cdot 10^{-7}$

Коэффициенты модели определяются в соответствии с выражениями (4.8 - 4.14). При $k=3$, $n_0=1$, $\alpha=1.215$ (звездное плечо) были получены следующие значения коэффициентов (табл. 4.12).

Таблица 4.12 – Значения коэффициентов модели

Коэффициент	значение
b_0	0,01657
b_1	0,00237
b_2	-0,00279
b_3	-0,00025
b_{11}	-0,00031
b_{22}	-0,00044
b_{33}	-0,00048
b_{12}	-0,00028
b_{13}	0,00037
b_{23}	0,00052

Тогда уравнение регрессии принимает вид:

$$\begin{aligned}
 y_2 = & 0.01657 + 0.00237x_3 - 0.00279x_4 - 0.00025x_5 - \\
 & - 0.00031x_3^2 - 0.00044x_4^2 - 0.00048x_5^2 - \\
 & - 0.00028x_3x_4 + 0.00037x_3x_5 + 0.00052x_4x_5;
 \end{aligned} \tag{4.23}$$

Проверка адекватности полученного уравнения осуществляется по критерию Фишера (4.16). Значение критерия Фишера (F), рассчитанное при помощи уравнения, не должно превышать его критического значения ($F_{кр}$) [120]. С учетом (4.16-4.17), были определены дисперсии адекватности и значения критерия Фишера (табл. 4.13).

Очевидно, что условие $F < F_{кр}$ выполняется, следовательно, уравнение (4.23) является адекватным реальным процессам в рамках принятых условий и допущений.

Таблица 4.13 – Результаты расчета дисперсии адекватности и критерия Фишера

Показатель	Критерий
Дисперсия адекватности	$1,6836 \cdot 10^{-6}$
Критерий Фишера F	5,00
$F_{кр}$	5,05

С целью проверки значимости коэффициентов уравнения (4.23), получены статистические оценки дисперсии коэффициентов по формулам (4.18-4.22). Критическое значение критерия Стьюдента $t_{s,кр}$ для числа степеней свободы $f_E = 5$ при уровне значимости 5% равно 2,57 [120]. Вычисления по формулам (4.18) – (4.21) приводят к следующим оценкам (табл. 4.14).

Таблица 4.14 – Оценка значимости коэффициентов регрессии

Коэффициент	s_i^2	$t_{s,кр} \cdot s_i^2$	Вывод
b_0	$2,24 \cdot 10^{-8}$	$5,75 \cdot 10^{-8}$	Значим
b_1	$3,07 \cdot 10^{-8}$	$7,88 \cdot 10^{-8}$	Значим
b_2	$3,07 \cdot 10^{-8}$	$7,88 \cdot 10^{-8}$	Значим
b_3	$3,07 \cdot 10^{-8}$	$7,88 \cdot 10^{-8}$	Значим
b_{11}	$7,71 \cdot 10^{-8}$	$1,98 \cdot 10^{-9}$	Значим
b_{22}	$7,71 \cdot 10^{-8}$	$1,98 \cdot 10^{-9}$	Значим
b_{33}	$7,71 \cdot 10^{-8}$	$1,98 \cdot 10^{-9}$	Значим
b_{12}	$4,2 \cdot 10^{-8}$	$1,07 \cdot 10^{-9}$	Значим
b_{13}	$4,2 \cdot 10^{-8}$	$1,07 \cdot 10^{-9}$	Значим
b_{23}	$4,2 \cdot 10^{-8}$	$1,07 \cdot 10^{-9}$	Значим

Для всех оценок коэффициентов уравнения (4.23) неравенство (4.22) выполняется. Следовательно, уравнение имеет вид, представленный выражением (4.23).

Анализируя результаты, приведенные на рис.4.12, видим, что при увеличении расхода сточных вод (x_3), поступающих на очистку, увеличивается концентрация загрязнений на выходе из сооружений очистки. Концентрация загрязнений в поступающих на очистку сточных водах (x_4) также оказывает влияние на концентрацию загрязнений в очищенной воде. При увеличении (x_4) концентрация загрязнений на выходе уменьшается, что можно объяснить тем, что недостаточное количество загрязнений в сточных водах не обеспечивает прироста активного ила, который и является потребителем загрязнений.

Таким образом, все параметры, входящие в уравнении (4.23) влияют на изменение концентрации загрязнений на выходе из сооружений биологической очистки и их влияние показано на рис. 4.12-4.14.

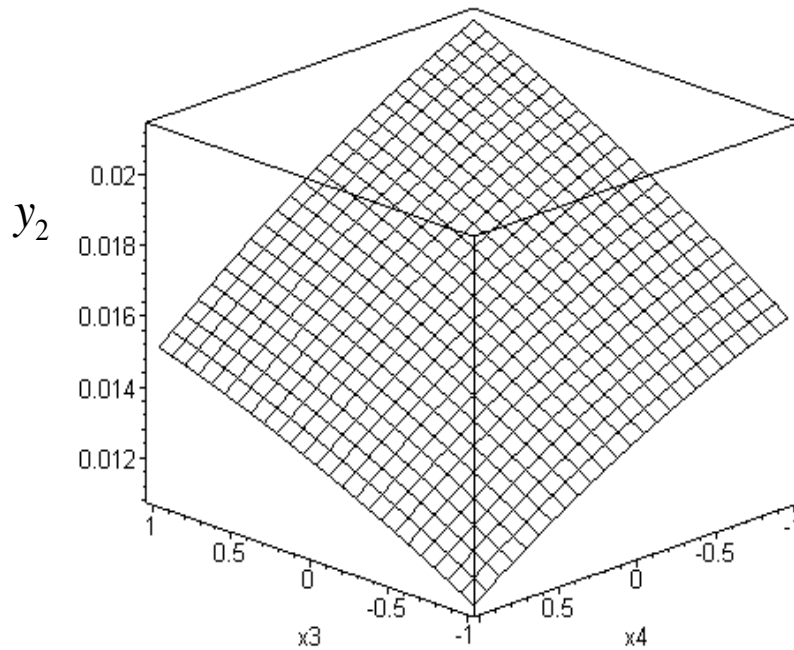


Рисунок 4.12 – Изменение концентрации загрязнений в очищенной воде (y_2) в зависимости от расхода сточных вод (x_3) и концентрации загрязнений в сточных водах, поступающих на очистку (x_4)

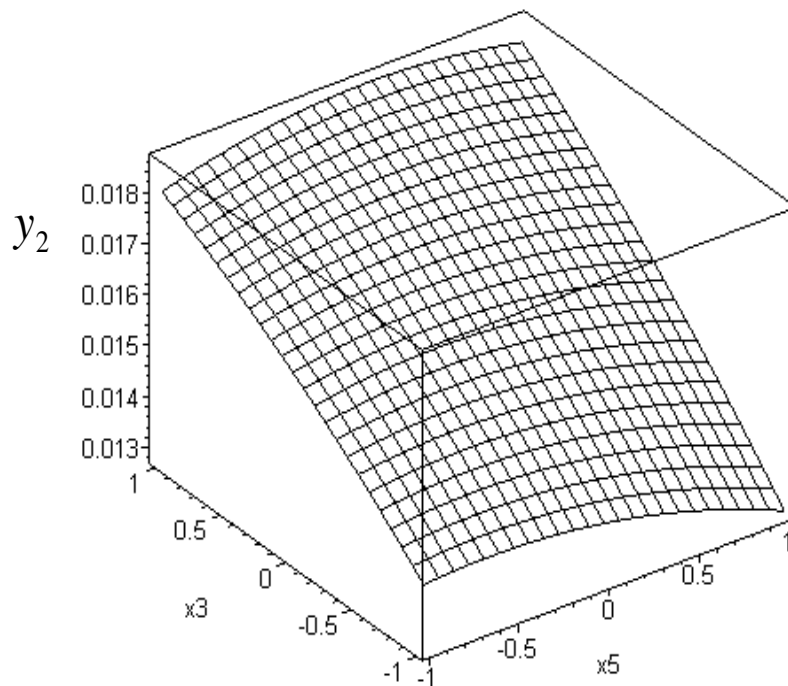


Рисунок 4.13 – Изменение концентрации загрязнений в очищенной воде (y_2) в зависимости от расхода сточных вод (x_3) и дозы ила по массе (x_5)

На рис.4.13-4.14 показано изменение концентрации загрязнений в очищенной воде в зависимости от концентрации загрязнений в сточных водах, поступающих на очистку (x_4), дозы ила по массе (x_5).и от расхода сточных вод (x_3).

Анализ результатов рис.4.13 показал, что большее влияние на концентрацию загрязнений на выходе из сооружений очистки оказывает расход сточных вод, при этом влияние дозы ила по сравнению с влиянием расхода сточных вод незначительно. Необходимо отметить, что оба фактора способствуют увеличению концентрации загрязнений в очищаемой воде, хотя при увеличении дозы ила (то есть биомассы, потребляющей загрязнения) концентрация загрязнений на выходе уменьшается.

Анализ результатов расчета, приведенного на рис.4.14. показал, что при увеличении концентрации загрязнений в сточных водах, поступающих на очистку, и при увеличении дозы ила происходит уменьшение концентрации загрязнений на выходе из сооружений биологической очистки. Однако это утверждение верно только в рассматриваемых пределах.

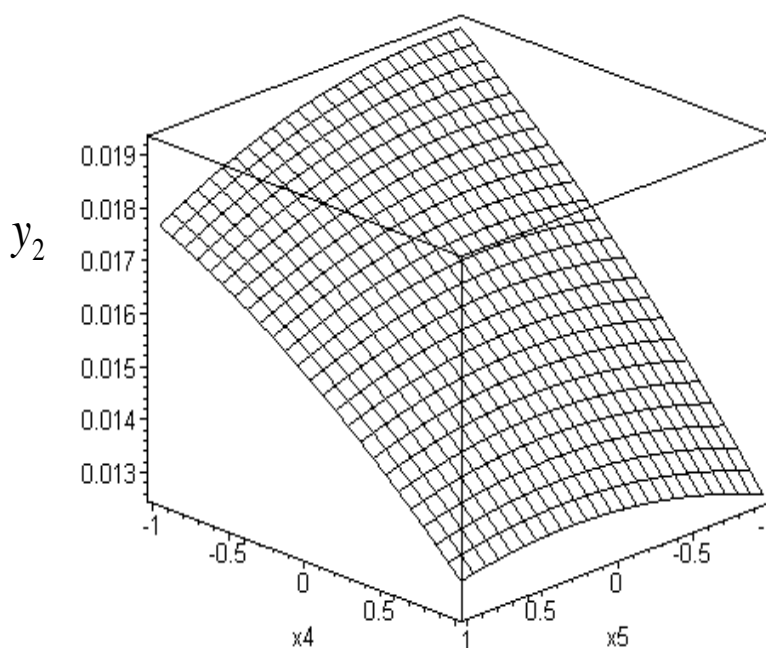


Рисунок 4.14 – Изменение концентрации загрязнений в очищенной воде (y_2) в зависимости от дозы ила по массе (x_5) и концентрации загрязнений в сточных водах, поступающих на очистку (x_4)

4.3 Анализ адекватности математической модели процесса биологической очистки в аэротенке экспериментальным исследованиям

Адекватность предложенной в разделе 3 модели (3.5)–(3.8) проверялась путем сравнения результатов расчетов по предложенной математической модели процессов биологической очистки в аэротенке промежуточного типа с регенератором [126-128] и результатов, полученных на основании эмпирической зависимости (4.15) и (4.23).

Для проверки адекватности описания процесса биологической очистки, происходящего в первой фазе очистки, с использованием системы уравнений (3.5)–(3.8), результаты расчетов, полученных с использованием эмпирической зависимости (4.15) сравнивались с результатами расчета по предложенной системе уравнений (3.5)–(3.8). Расчеты по уравнениям (3.5)–(3.8) производились в тех же пределах, приведенных в табл. 4.1, что и для эмпирической зависимости. Результаты теоретических расчетов, полученные с использованием системы уравнений (3.5)–(3.8), и соответственно результаты экспериментальных измерений для первой фазы биологической очистки приведены в табл. 4.21. Сравнивая полученные результаты, видим, что они согласуются между собой.

Таблица 4.21 – Результаты экспериментальных измерений и теоретических расчетов

Опыт	№	Доза ила, полученная при экспериментальных измерениях, $г \cdot (дм^3)^{-1}$	Доза ила, полученная при теоретических расчетах, $г \cdot (дм^3)^{-1}$
		Y_1	$Y_1^{теор}$
Планирование типа 2^2	1	4,63	4,74
	2	2,61	2,54
	3	4,48	4,50
	4	2,37	2,42
Центр плана	5	3,61	3,56
Звездные точки	6	3,62	3,65
	7	3,48	3,46
	8	4,68	4,63
	9	2,50	2,48

Численное решение, полученное при проведении расчета с использованием системы уравнений (3.5)–(3.8) для первой фазы очистки, приведено на рис. 4.15.

Анализируя полученные результаты расчета, приведенные на рис.4.15 видим, что аналогично результатам на рис.4.11 при увеличении расхода активного ила, поступающего в регенератор, изменение дозы ила на выходе из пе-

рвого коридора происходит в пределах $0,1-0,2 \text{ г/дм}^3$. При этом увеличение концентрации активного ила, поступающего на регенерацию, приводит к изменению дозы ила на выходе в пределах $3,5-4,5 \text{ г/дм}^3$.

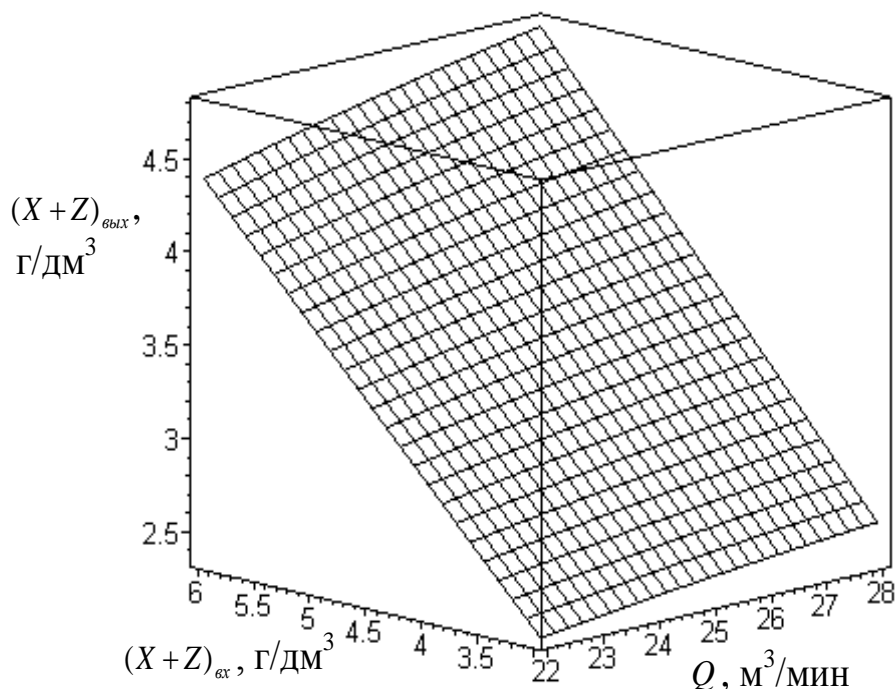


Рисунок 4.15 – Изменение дозы ила в регенераторе аэротенка $(X+Z)_{\text{вых}}$ в зависимости от дозы ила $(X+Z)_{\text{вх}}$, поступающего в регенератор, и расхода активного ила Q

Для проверки адекватности описания процесса биологической очистки, происходящего во второй–четвертой фазах очистки, при использовании системы уравнений (3.5)–(3.8), результаты расчетов, полученных с использованием эмпирической зависимости (4.23) сравнивались с результатами расчета по предложенной системе уравнений (3.5)–(3.8). Расчеты по уравнениям (3.5)–(3.8) производились в тех же пределах, приведенных в табл. 4.8, что и для эмпирической зависимости (4.23).

Результаты теоретических расчетов, полученные с использованием системы уравнений (3.5)–(3.8), и соответственно результаты экспериментальных измерений для первой фазы биологической очистки приведены в табл. 4.22.

Сравнивая полученные результаты экспериментальных измерений и теоретических расчетов, видим, что они качественно согласуются между собой.

Результаты, полученные при проведении расчета с использованием системы уравнений (3.5)–(3.8), для процессов, протекающих во втором, третьем и четвертом коридорах аэротенка с учетом процесса отстаивания во вторичном отстойнике, приведены на рис. 4.16-4.18.

Таблица 4.22 – Результаты теоретических расчетов и экспериментальные данные

Опыт	№	Концентрация загрязнений в сточных водах y_2 , полученная при экспериментальных измерениях, $г \cdot (дм^3)^{-1}$	Концентрация загрязнений в сточных водах $y_2^{теор}$, полученная при теоретических расчетах, $г \cdot (дм^3)^{-1}$
Планирование типа 2^3	1	0,0163	0,0153
	2	0,0151	0,0146
	3	0,0210	0,0209
	4	0,0219	0,0221
	5	0,0113	0,0116
	6	0,0116	0,0118
	7	0,0149	0,0155
	8	0,0173	0,0175
Центр плана	9	0,0169	0,0166
Звездные точки	10	0,020	0,0191
	11	0,0144	0,0140
	12	0,015	0,0135
	13	0,0210	0,0196
	14	0,0168	0,0161
	15	0,01710	0,0167

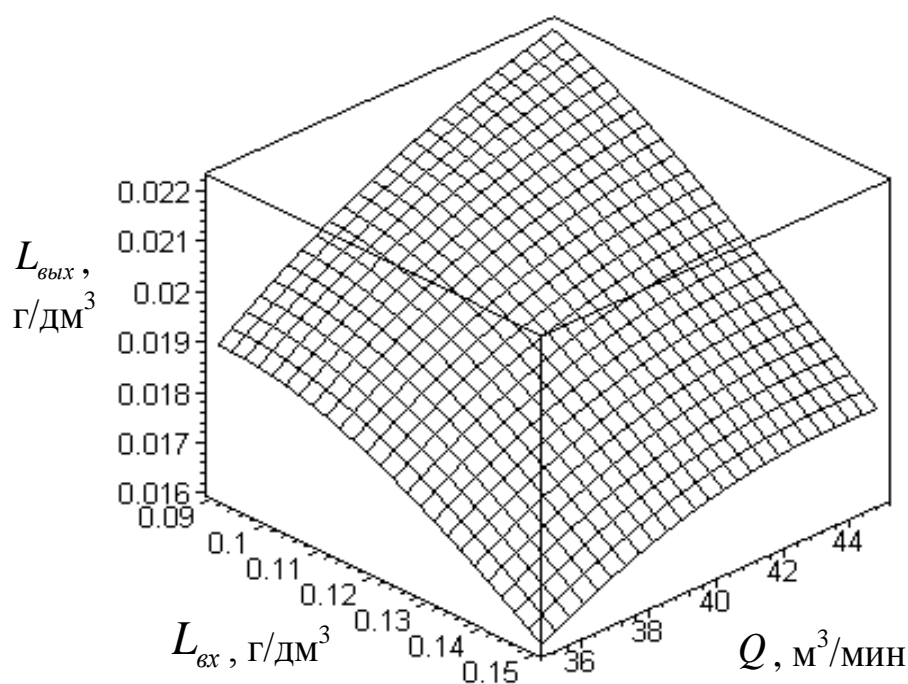


Рисунок 4.16 – Изменение концентрации загрязнений $L_{вых}$ в очищенных сточных водах от концентрации загрязнений в поступающих стоках $L_{вх}$ и от расхода сточных вод Q

Анализируя результаты, приведенные на рис.4.16 видим, что аналогично результатам, приведенным на рис.4.12, при увеличении расхода сточных вод концентрация загрязнений на выходе из сооружений увеличивается. При увеличении концентрации загрязнений в поступающих на очистку сточных водах концентрация загрязнений на выходе из сооружений уменьшается. При минимальном расходе сточных вод минимальная концентрация загрязнений достигается при концентрации загрязнений в поступающих стоках $0,15 \text{ г/дм}^3$. При максимальном расходе сточных вод минимальная концентрация загрязнений достигается при концентрации загрязнений $0,15 \text{ г/дм}^3$.

На рис.4.17 показано изменение концентрации загрязнений в очищаемой воде на выходе в зависимости от изменения расхода сточных вод и дозы ила, подаваемой в начало второго коридора аэротенка.

Из рисунка видно, что увеличение расхода сточных вод приводит к значительному увеличению концентрации загрязнений на выходе из аэротенка при максимальной дозе ила, подаваемой в аэротенк. Наименьшее значение концентрации загрязнений на выходе из сооружений получено для расхода сточных вод $45 \text{ м}^3/\text{мин}$ и дозы ила, равной 3 г/дм^3 . Такой результат хорошо согласуется с результатом, приведенным на рис. 4.13.

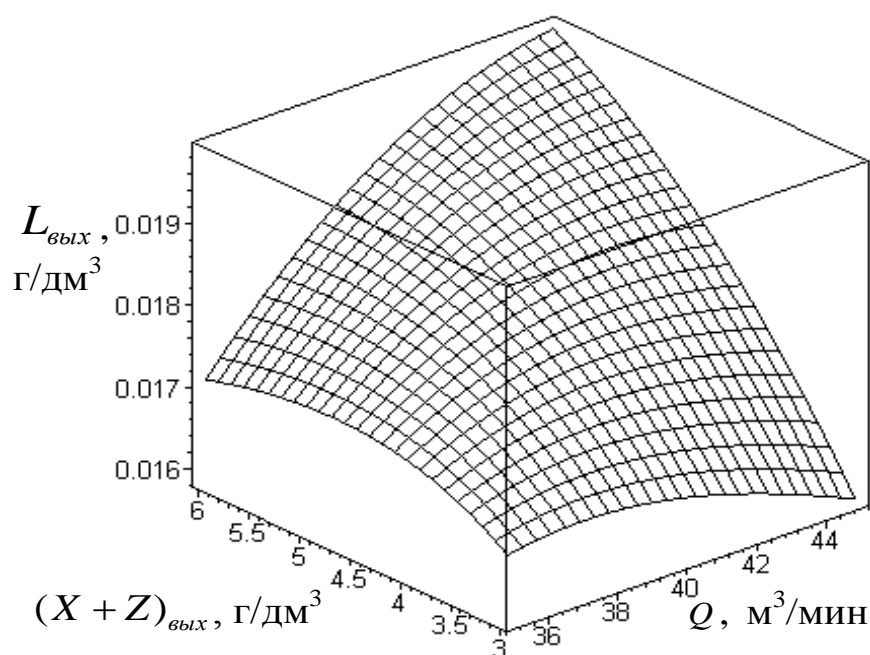


Рисунок 4.17 – Изменение концентрации загрязнений $L_{\text{вых}}$ в сточных водах в зависимости от дозы ила в регенераторе аэротенка $(X+Z)_{\text{вых}}$ и от расхода сточных вод Q

Влияние концентрации загрязнений в поступающих на очистку стоках и дозы ила, подаваемого во вторую фазу очистки, показано на рис. 4.18. Сравнивая приведенные на рис. 4.18 и рис. 4.14 результаты, видим, что они качественно согласуются между собой.

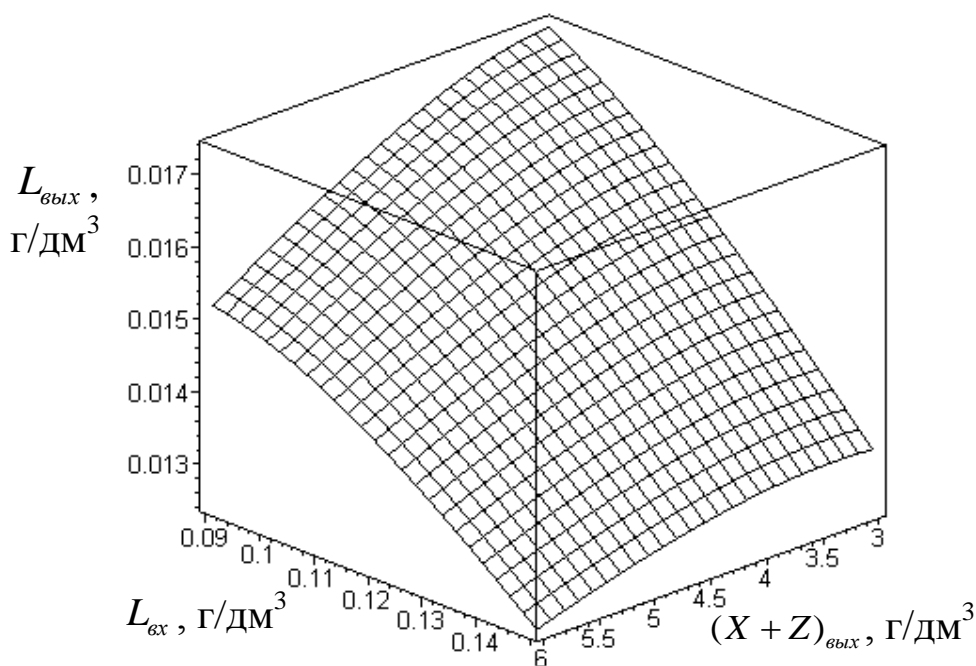


Рисунок 4.18 – Изменение концентрации загрязнений на выходе из аэротенка $L_{\text{вых}}$ в зависимости от дозы ила в регенераторе аэротенка $(X+Z)_{\text{вых}}$ и от концентрации загрязнений в поступающих стоках $L_{\text{вх}}$

Как видно из сравнения результатов численных расчетов, приведенных на рис. 4.11 и 4.15, 4.12-4.14 и 4.16-4.18, результаты теоретических расчетов и результаты экспериментальных измерений на действующих сооружениях согласуются между собой, расхождение не превышает 10 %.

Следовательно, предложенная математическая модель является адекватной реальным процессам в рамках принятых условий и допущений. Полученные результаты можно использовать для исследования влияния отдельных факторов (расхода сточных вод, расхода активного ила, дозы илы, концентрации загрязнений в поступающих на очистку сточных водах) на протекание процесса биологической очистки в отдельных коридорах аэротенка. И на основании полученных результатов производить выбор технологического режима работы аэротенка для получения на выходе из сооружений очистки концентрации загрязнений по органическим веществам не выше значений, установленных ПДК.

Также были проведена серия экспериментов по определению зависимости концентрации загрязнений в очищенных сточных водах на выходе из сооружений биологической очистки от значения концентрации загрязнений в сточных водах, поступающих на очистку в аэротенк, расхода сточных вод, а также концентрации составляющих активного ила – хлопьев и дисперсных бактерий для различных вариантов подачи сточных вод (через одно окно, через два окна и через три окна). Полученные результаты позволяют сделать вывод об адекватности предложенной модели реальным процессам в рамках принятых условий и допущений.

Полученные эмпирические зависимости (4.15) и (4.23) могут быть использованы для определения концентраций соответственно активного ила на выходе из регенератора и загрязнений на выходе из сооружений биологической очистки. Однако в дальнейшем для проведения расчетов предлагается использовать математическую модель (3.5)–(3.8). С помощью предложенной модели (3.5)–(3.8) можно не только получить численное значение интересующих параметров, но и исследовать поведение отдельных составляющих, влияющих на процесс протекания биологической очистки сточных вод в системе «аэротенк – вторичный отстойник».

Выводы к разделу 4

На основании проведенных экспериментальных исследований установлена эмпирическая зависимость изменения концентрации активного ила на выходе из регенератора от концентрации ила, поступающего на регенерацию, и от его расхода, позволяющая определить дозу ила на выходе из регенератора.

В результате экспериментальных исследований установлена эмпирическая зависимость изменения концентрации загрязнений в очищенной воде на выходе из сооружений очистки от дозы ила, от концентрации загрязнений в поступающих на очистку сточных водах и от их расхода.

1. Анализ адекватности полученных зависимостей, который выполнялся по критерию Фишера, показал, что в рамках проведения эксперимента уравнения адекватно описывают процессы биологической очистки в системе «аэротенк – вторичный отстойник».

2. Сравнение результатов, полученных при проведении экспериментальных измерений и при использовании предложенной модели процесса биологической очистки сточных вод (3.5)–(3.8) показало, что результаты расчетов качественно совпадают между собой. Предложенная математическая модель является адекватной реальным процессам в рамках принятых условий и допущений.

РАЗДЕЛ 5

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД

5.1 Разработка метода выбора технологического режима работы аэротенка промежуточного типа с регенератором при очистке городских сточных вод

Эффективное применение аэротенка промежуточного типа с регенератором с целью получения на выходе из сооружений биологической очистки показателей качества воды по органическим загрязнениям не выше предельно допустимых концентраций зависит от правильного выбора режима работы аэротенка при конкретных условиях его эксплуатации [129-137].

Выбор технологического режима работы аэротенка осуществляется после того, как проведен предварительный анализ следующих вопросов:

- социально-экономической необходимости изменения технологического режима работы аэротенка;
- анализ лабораторных данных результатов очистки на выходе из сооружений;
- анализ особенностей конструктивных, объемно-планировочных и коммуникационных решений рассматриваемого сооружения.

В общем случае, выбор технологического режима работы аэротенка осуществляется в таком порядке:

- лабораторные исследования основных показателей работы сооружений биологической очистки сточных вод;
- анализ полученных результатов;
- принятие решения о необходимости внесения изменений в технологический регламент работы аэротенка.

В данной работе для повышения эффективности работы сооружений биологической очистки, включающих в себя аэротенк промежуточного типа с регенератором (рис.5.1), предлагается использовать метод выбора технологического режима работы аэротенка [138-140].

Сущность метода заключается в том, что на основании полученных данных лабораторных исследований (концентрация загрязнений в сточных водах на входе в аэротенк, концентрация активного ила, расход сточных вод и активного ила) осуществляется оперативное регулирование соотношения «сточная вода – активный ил» с целью повышения эффективности процесса биологической очистки в аэротенке и получения на выходе из сооружений биологической очистки концентрации загрязняющих веществ не выше предельно допустимых значений.

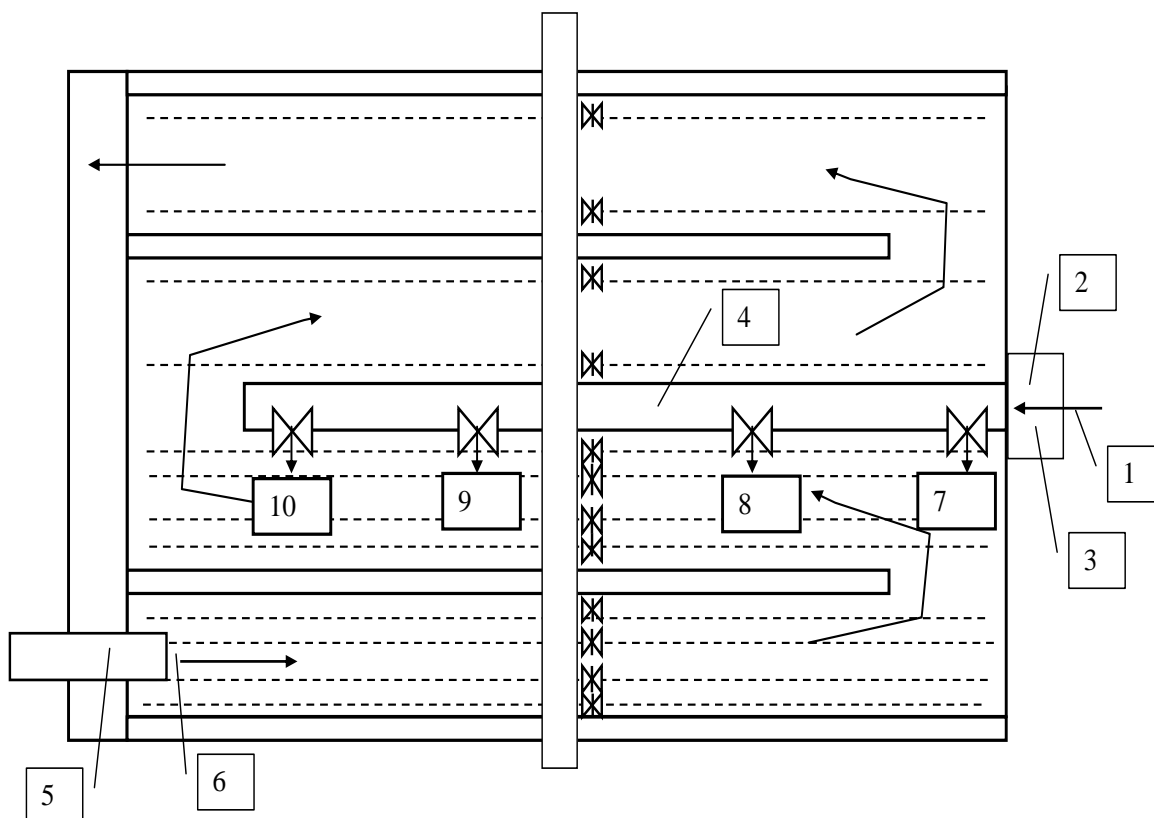


Рисунок 5.1 – Схема четырехкоридорного аэротенка:

1 – трубопровод подачи сточных вод в секцию аэротенка; 2 – распределительная камера, 3 – место измерения концентрации загрязнений в сточных водах, поступающих на очистку, и их расхода; 4 – распределительный лоток, 5 – трубопровод подачи активного ила, 6 – место измерения концентрации дозы ила, 7 – первое окно, через которое может подаваться сточная вода, 8 – второе окно, через которое может подаваться сточная вода, 9 – третье окно, через которое может подаваться сточная вода, 10 – четвертое окно, через которое может подаваться сточная вода

Поставленное задание решается благодаря тому, что на основе оценки качества очищенных вод на выходе из сооружений очистки выбирается вариант подачи сточных вод через впускные окна, расположенные на распределительном канале аэротенка. Благодаря этому обеспечивается концентрация органических загрязнений в очищенной воде на выходе не превышающая предельно допустимого значения, концентрация ила при этом соответствует установленной регламентом эксплуатации сооружений. Использование предложенного метода выбора технологического режима работы аэротенка промежуточного типа с регенератором при очистке городских сточных вод позволяет:

–контролировать состояние процесса биологической очистки сточных вод на разных этапах очистки в аэротенке;

–использовать в качестве контролирующих параметров показатели качества сточных вод, поступающих на очистку (концентрацию загрязнений по

БПК); расход сточных вод, поступающих на очистку; показатели качества активного ила;

–использовать полученные данные лабораторных анализов для принятия решения об изменении режима подачи стоков на очистку;

–повысить эффективность биологической очистки сточных вод от органических загрязнений.

Последовательность работы по предложенному методу представлена на рис. 5.2 в виде алгоритма.

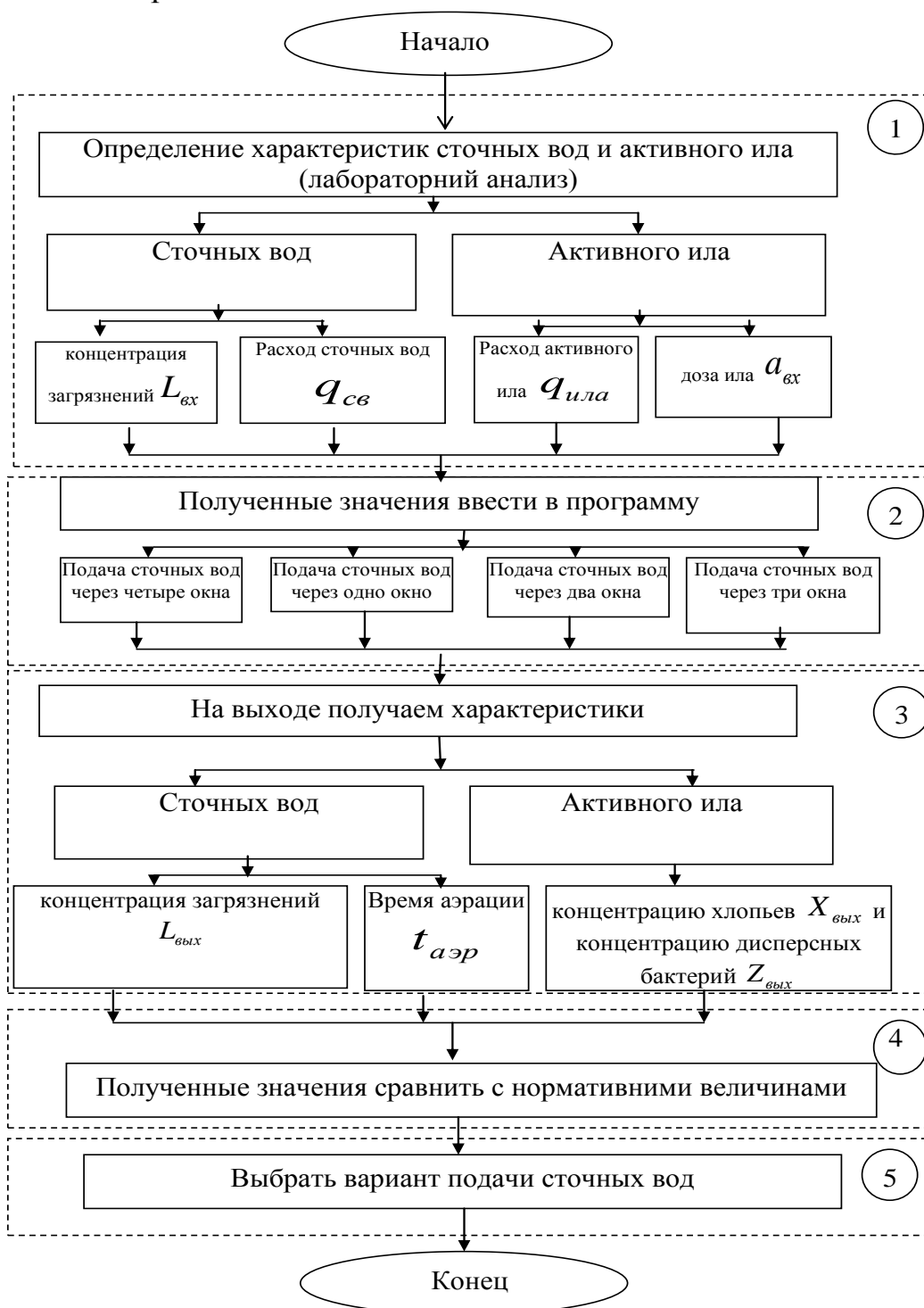


Рисунок 5.2. – Алгоритм выбора варианта подачи сточных вод

Общие положения. Последовательность решения задачи.

1. Задача выбора технологического режима работы аэротенка подразумевает, что одним из критериев эффективности работы сооружения является концентрация загрязнений в очищенной воде на выходе из сооружений биологической очистки, т.е. эффект очистки по органическим загрязнениям.

2. Для конкретного сооружения определяются характеристики сточных вод (концентрация загрязнений в сточных водах $L_{вх}$, которые поступают на очистку, их расход $Q_{св}$), и активного ила (доза активного ила $q_{ила}$ и расход ила, который подается в регенератор аэротенка).

3. Рассчитываются значения концентрации загрязнений на выходе из сооружений очистки $L_{вых}$, концентрации составляющих активного ила: хлопьев $X_{вых}$ и дисперсных бактерий $Z_{вых}$ с помощью компьютерной программы, которая имитирует процесс биологической очистки в четырехкоридорном аэротенке промежуточного типа с регенератором и с возможностью рассредоточенной подачи сточных вод. Кроме того определяется время нахождения смеси сточных вод и активного ила в сооружениях $t_{аэр}$. Расчет параметров производится для разных вариантов подачи сточных вод в аэротенк: через четыре окна; через одно окно; через два окна; через три окна одновременно.

4. Выполняется сравнение полученных значений концентраций $L_{вых}$, $X_{вых}$, $Z_{вых}$ для всех вариантов с нормативными значениями. С учетом того, что сумма значений $X_{вых}$ и $Z_{вых}$ является значением дозы ила $a_{вых}$.

5. Принимается решение о выборе варианта подачи сточных вод в аэротенк для рассматриваемых условий.

6. Определяется эффективность очистки по органическим загрязнениям.

Настоящий метод выбора предназначен для проектировщиков сооружений очистки сточных вод, а также практических работников (технологов), эксплуатирующих очистные сооружения, в состав которых входят сооружения биологической очистки «аэротенк – вторичный отстойник». Метод применим при очистке городских сточных вод в коридорных аэротенках с возможностью рассредоточенной подачи сточных вод. Для повышения оперативности предложенного метода предлагается параллельно измерять значения и БПК₅ и ХПК. Полученные значения ХПК перевести в БПК₅ по имеющимся коэффициентам.

Выбор и подготовка исходных данных.

1. При расчете эффективности работы аэротенка и определения концентрации загрязнений на выходе из сооружений очистки учитывается:

– конструктивные особенности аэротенка;

- характеристики сточной жидкости, поступающей на очистку;
- характеристики активного ила, подаваемого в сооружение.

2. Перечень необходимых исходных данных, необходимых для расчета концентрации загрязнений по органическим загрязнениям на выходе из сооружений биологической очистки приведен в табл. 5.1:

Таблица 5.1 – Исходные данные

№ п/п	Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение параметра
1	Характеристики сточной жидкости, поступающей на очистку			
	концентрация загрязнений БПК ₅	<i>A</i>	г·(дм ³) ⁻¹	
	расход сточных вод	<i>q_{св}</i>	м ³ ·мин ⁻¹	
2	Характеристика активного ила, поступающего на регенерацию			
	доза ила по массе	<i>a_{вх}</i>	г·(дм ³) ⁻¹	
	расход ила	<i>q_{ила}</i>	м ³ ·мин ⁻¹	
3	Размеры секции аэротенка			
	длина коридора	<i>a</i>	м	
	ширина коридора	<i>b</i>	м	
	глубина коридора	<i>h</i>	м	

1. Расчет концентрации загрязнений на выходе из сооружений биологической очистки для варианта подачи сточных вод через все четыре впускных окна на распределительном канале.

1.Задать исходные данные в соответствии с табл. 5.1. Для этого измерить БПК₅ сточных вод и их расход в точке 3, а также дозу и расход ила в точке 6 (рис.5.1).

2.Полученные результаты внести в исходные данные для решения системы уравнений, разработанной математической модели процесса биологической очистки сточных вод, которая реализована в виде компьютерной программы, имитирующей процесс биологической очистки в системе «аэротенк – вторичный отстойник». Рассматривается вариант подачи сточных вод через окна 7, 8, 9 и 10 (рис.5.1).

3. Рассчитать концентрацию загрязнений на выходе из сооружений по органическим веществам, концентрацию составляющих активного ила (хлопьев и дисперсных бактерий), время нахождения смеси в сооружениях.

4.Рассчитать эффект очистки по органическим загрязнениям, %:

$$\mathcal{E} = \frac{L_{вх} - L_{вых}}{L_{вх}} \cdot 100 \quad (5.1)$$

5. Полученные значения концентрации загрязнений и дозы ила сравнить с нормативными.

2. Расчет концентрации загрязнений на выходе из сооружений биологической очистки для варианта подачи сточных вод через одно впускное окно на распределительном канале.

1. Задать исходные данные в соответствии с табл. 5.1. Для этого измерить БПК₅ сточных вод и их расход в точке 3, а также дозу и расход ила в точке 6 (рис.5.1).

2. Полученные результаты внести в исходные данные для решения системы уравнений, разработанной математической модели процесса биологической очистки сточных вод, которая реализована в виде компьютерной программы, имитирующей процесс биологической очистки в системе «аэротенк – вторичный отстойник». Рассматривается вариант подачи сточных вод через окна 7, или 8, или 9 или 10 (рис.5.1).

3. Рассчитать концентрацию загрязнений на выходе из сооружений биологической очистки по органическим элементам, концентрацию составляющих активного ила (хлопьев и дисперсных бактерий), время нахождения смеси в сооружениях.

4. Выполнить сравнение полученных значений концентраций $L_{вых}$, $X_{вых}$, $Z_{вых}$ для всех вариантов с нормативными значениями. С учетом того, что сумма значений $X_{вых}$ и $Z_{вых}$ является значением дозы ила $a_{вых}$.

5. Принять решение о выборе варианта подачи сточных вод в аэротенк для рассматриваемых условий.

6. Рассчитать эффект очистки по органическим загрязнениям (5.1).

3. Расчет концентрации загрязнений на выходе из сооружений биологической очистки для варианта подачи сточных вод через два впускных окна на распределительном канале.

1. Задать исходные данные в соответствии с табл. 5.1. Для этого измерить БПК₅ сточных вод и их расход в точке 3, а также дозу и расход ила в точке 6 (рис.5.1).

2. Полученные результаты внести в исходные данные для решения системы уравнений, разработанной математической модели процесса биологической очистки сточных вод, которая реализована в виде компьютерной программы, имитирующей процесс биологической очистки в системе «аэротенк – вторичный отстойник». Рассматривается вариант подачи сточных вод через окна 7, 8, или 7, 9, или 7, 10, или 8, 9 или, 8, 10, или 9, 10 (рис.5.1).

3. Рассчитать концентрацию загрязнений на выходе по органическим веществам, концентрацию составляющих активного ила (хлопьев и дисперсных бактерий), время нахождения смеси в сооружениях биологической очистки.

4. Выполнить сравнение полученных значений концентраций $L_{вых}$, $X_{вых}$, $Z_{вых}$ для всех вариантов с нормативными значениями. С учетом того, что сумма значений $X_{вых}$ и $Z_{вых}$ является значением дозы ила $a_{вых}$.

5. Принять решение о выборе варианта подачи сточных вод в аэротенк для рассматриваемых условий.

6. Рассчитать эффект очистки по органическим загрязнениям (5.1).

4. Расчет концентрации загрязнений на выходе из сооружений биологической очистки для варианта подачи сточных вод через три впускных окна на распределительном канале.

1. Задать исходные данные в соответствии с табл. 5.1. Для этого измерить БПК₅ сточных вод и их расход в точке 3, а также дозу и расход ила в точке 6 (рис.5.1).

2. Полученные результаты внести в исходные данные для решения системы уравнений, разработанной математической модели процесса биологической очистки сточных вод, которая реализована в виде компьютерной программы, имитирующей процесс биологической очистки в системе «аэротенк – вторичный отстойник». Рассматривается вариант подачи сточных вод через окна 7, 8, 9 или 7, 9, 10 или 7, 8, 10 или 8, 9, 10 (рис.5.1).

3. Рассчитать концентрацию загрязнений на выходе из сооружений по органическим веществам, концентрацию составляющих активного ила (хлопьев и дисперсных бактерий), время нахождения смеси в сооружениях.

4. Выполнить сравнение полученных значений концентраций $L_{вых}$, $X_{вых}$, $Z_{вых}$ для всех вариантов с нормативными значениями с учетом того, что сумма значений $X_{вых}$ и $Z_{вых}$ является значением дозы ила $a_{вых}$.

5. Принять решение о выборе варианта подачи сточных вод в аэротенк для рассматриваемых условий.

6. Рассчитать эффект очистки по органическим загрязнениям (5.1).

Окончательное решение по выбору технологического режима работы аэротенка остается за технологом предприятия или проектировщиком. При этом технолог (проектировщик) будет обладать исчерпывающей информацией о характере протекания процессов в аэротенке на разных этапах очистки в разных коридорах, о времени прохождения смеси активного ила и сточных вод по аэротенку, а также о процессе биологической очистки в целом, при различных вариантах его протекания.

Практическая ценность разработанного метода заключается в том, с его помощью выбирается режим очистки сточных вод, при котором на выходе из сооружения биологической очистки получают значение концентрации по органическим веществам не выше предельно допустимых.

5.2 Практическая реализация метода выбора технологического режима работы аэротенка

Для оценки эффективности от внедрения предложенного метода выбора технологического режима работы аэротенка была определена эффективность очистки сточных вод от органических веществ для сооружений комплекса биологической очистки «Диканевский» г. Харьков для разных вариантов подачи сточных вод, что явилось практической реализацией предложенного метода. При этом получены следующие результаты.

Выбор и подготовка исходных данных.

1. При расчете эффективности работы аэротенка и определения концентрации загрязнений на выходе из сооружения в соответствии с табл. 5.1 выбираются следующие исходные данные (табл. 5.2):

Таблица 5.2 – Исходные данные

№ п/п	Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение параметра
1	Характеристики сточной жидкости, поступающей на очистку			
	концентрация загрязнений по БПК ₅	A	$\text{г} \cdot (\text{дм}^3)^{-1}$	0,11
	расход сточных вод	$q_{св}$	$\text{м}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$	45
2	Характеристика активного ила, поступающего на регенерацию			
	доза ила по массе	$a_{ак}$	$\text{г} \cdot (\text{дм}^3)^{-1}$	5,85
	расход ила	$q_{ила}$	$\text{м}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$	25,2
3	Размеры секции аэротенка			
	длина коридора	a	м	120
	ширина коридора	b	м	10
	глубина коридора	h	м	5,5

2. Полученные исходные данные вводятся в программу, которая имитирует процесс биологической очистки в четырехкоридорном аэротенке промежуточного типа с регенератором и дает возможность рассмотреть пятнадцать возможных вариантов подачи сточных вод в секцию аэротенка. Время расчета составляет от 15 до 30 секунд.

3. Результаты, полученные в результате расчета по предложенному методу, приведены на рис. 5.3–5.6.

4.Сравниваются полученные значения концентраций $L_{вых}$, $X_{вых}$, $Z_{вых}$ для всех пятнадцати вариантов с нормативными значениями. С учетом того, что сумма значений $X_{вых}$ и $Z_{вых}$ является значением дозы ила.

Анализируя результат расчета (рис. 5.3-а), видим, что концентрация загрязнений в очищенных сточных водах на выходе из сооружений уменьшается при увеличении концентрации загрязнений в поступающих на очистках сточных водах, при этом концентрация активного ила (рис. 5.3-б) увеличивается. Таким образом, достаточное количество питательных веществ для микроорганизмов активного ила способствует более эффективному протеканию процесса.

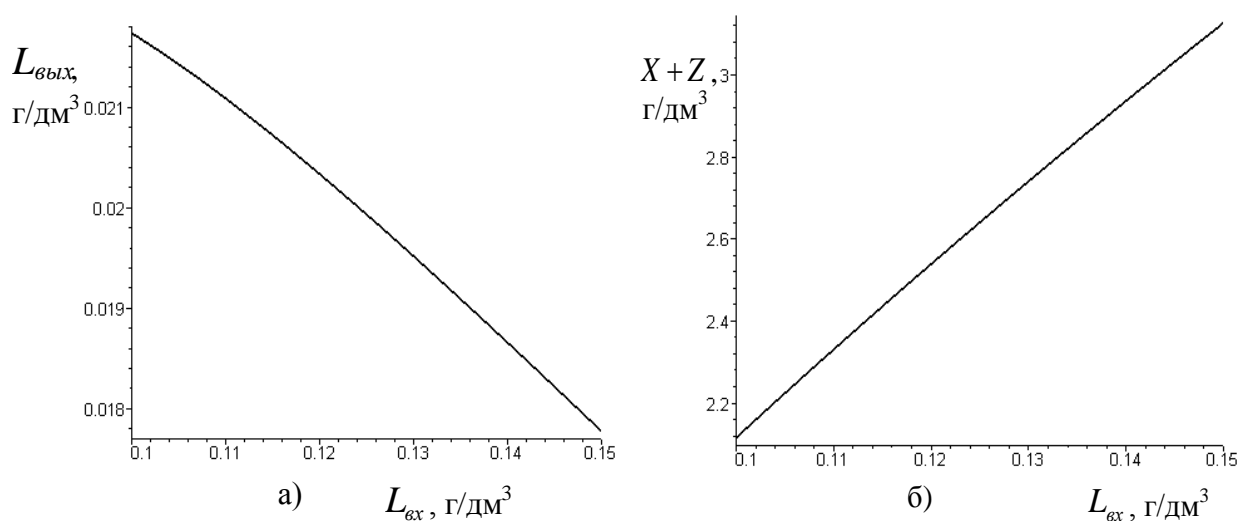


Рисунок 5.3 – Значения концентраций загрязнений $L_{вых}$ (а) и активного ила $X + Z$ (б) при подаче сточных вод через все впускные окна 7-8-9-10

Из рис. 5.4-а видно, что наибольшее значение концентрации загрязнений получены для варианта подачи через окна 7 и 10. Необходимо отметить, что для всех вариантов значения не превышают нормативные. При этом (рис.5.4-б) значения концентрации активного ила для всех вариантов подачи сточных вод изменяется практически одинаково в небольших пределах.

Результаты расчета (рис.5.5-а) для варианта подачи через два окна по показателю концентрация загрязнений на выходе из сооружений по всем вариантам превышают допустимые значения, кроме подачи через окна 7-8. Изменение концентрации активного ила (рис.5.5-б) происходит в пределах от 1,5 до 3 г/дм³.

Результаты расчета (рис.5.6-а) для варианта подачи через три окна по показателю концентрация загрязнений на выходе из аэротенка по всем вариантам превышают допустимые значения. Концентрация активного ила (рис.5.6-б) увеличивается при увеличении концентрации загрязнений в сточных водах, поступающих на очистку.

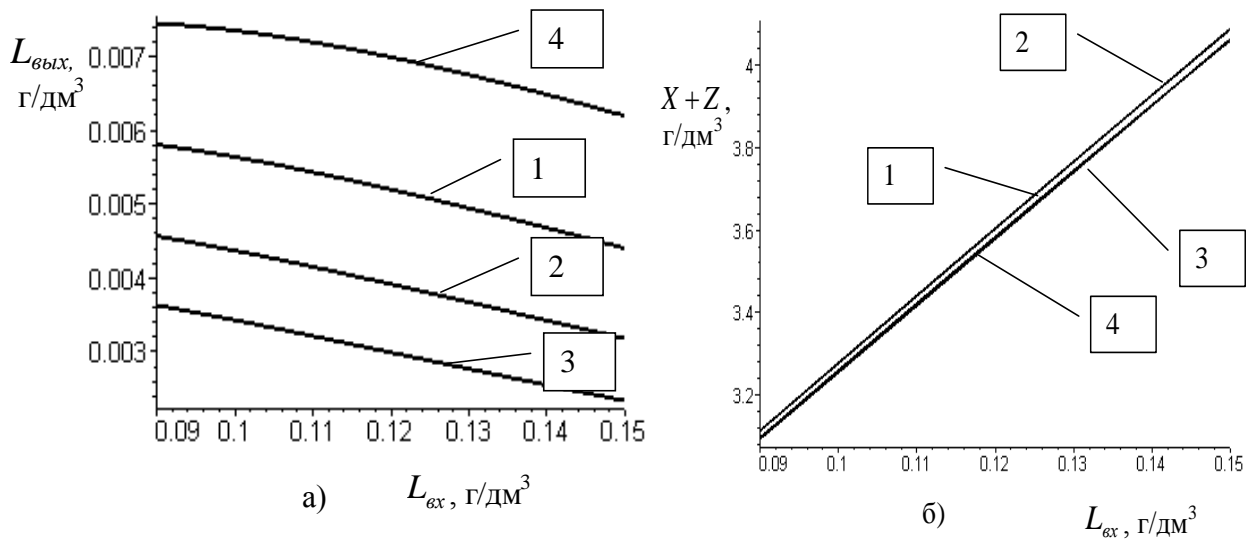


Рисунок 5.4 – Значения концентраций загрязнений $L_{вых}$ (а) и активного ила $X + Z$ (б) при подаче сточных вод через одно впускное окно:

1 – через окно 7; 2 – через окно 8; 3 – через окно 9; 4 – через окно 10

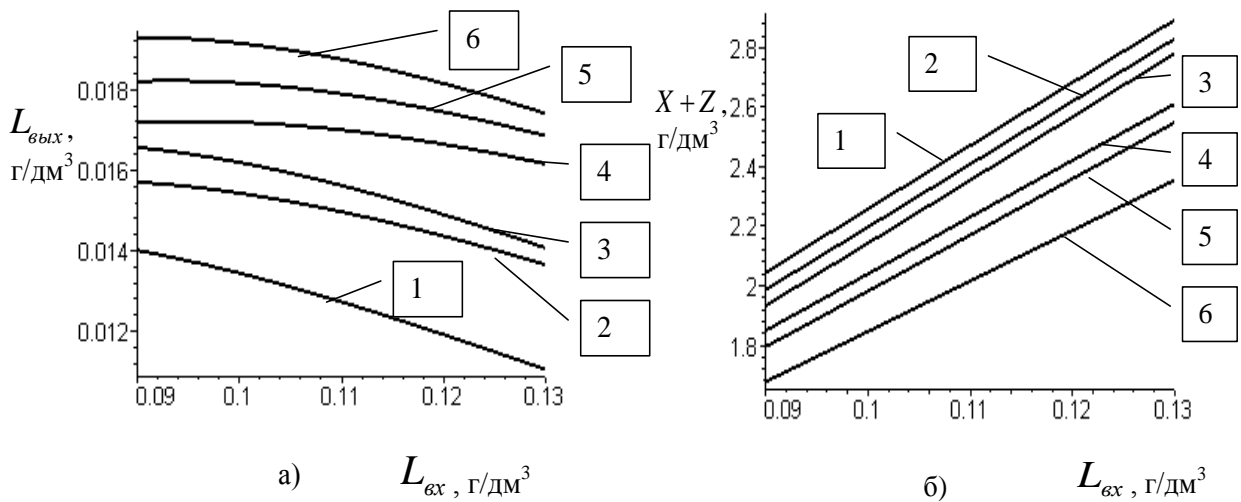


Рисунок 5.5 – Значения концентраций загрязнений $L_{вых}$ (а) и активного ила $X + Z$ (б) при подаче сточных вод через два впускных окна:

1 – через окна 7-8; 2 – через окна 7-9; 3 - через окна 7-10; 4 – через окна 8-9; 5 – через окна 8-10, 6 – через окна 9-10.

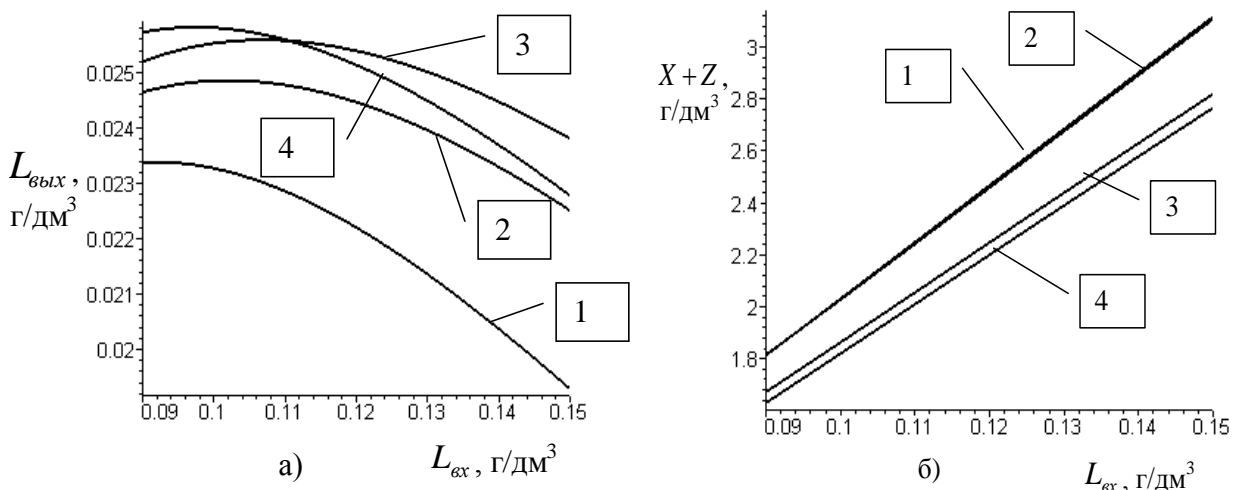


Рисунок 5.6 – Изменение концентраций загрязнений $L_{вых}$ (а) и активного ила $X + Z$ (б) при подаче сточных вод через три впускных окна:

1 – через окна 7-8-9; 2 – через окна 7-8-10; 3 – через окна 7-9-10; 4 – через окна 8-9-10

5. Принимается решение о выборе варианта подачи сточных вод.

Из рассмотренных вариантов подачи сточных вод для заданных исходных данных, выбирается наилучший вариант, при котором концентрация загрязнений на выходе из аэротенка не превышает допустимую и концентрация активного ила при этом соответствует требуемой регламентом. Этим условиям соответствует вариант подачи сточных вод через окна 7, 8, 9 и 10. Рекомендуется принять вариант подачи сточных вод через окно 7 (рис.5.4-а), так как при этом варианте подачи концентрация загрязнений на выходе минимальна, а значение концентрации дозы ила соответствует установленной регламентом.

Эффект очистки для этого варианта составит:

$$\mathcal{E}_{вар} = \frac{0,110 - 0,006}{0,110} \cdot 100 = 94 \text{ \%}.$$

Для основного варианта, которым является постоянно используемый вариант подачи сточных вод через все четыре окна 7-8-9-10, эффект очистки составляет:

$$\mathcal{E}_{баз.вар} = \frac{0,110 - 0,021}{0,110} \cdot 100 = 80 \text{ \%}.$$

Таким образом, работа аэротенка по варианту, выбранному после соответствующих расчетов с использованием предложенного метода выбора технологического режима работы сооружений биологической очистки сточных вод, позволяет, во-первых получить на выходе из сооружений значения концентрации загрязняющих веществ меньше, чем допустимые значения, во-вторых, улучшить эффект очистки по органическим загрязнениям на 10-14 %.

Выводы к разделу 5

1. Показано, что одним из основных направлений повышения эффективности работы сооружений биологической очистки является регулирование соотношения «сточная жидкость – активный ил» путем выбора технологического режима очистки для конкретных условий эксплуатации.

2. Предложен метод выбора технологического режима работы аэротенка промежуточного типа с регенератором для очистки городских сточных вод.

3. Практическая реализация метода выбора технологического режима работы аэротенка показала, что его использование обеспечивает повышение эффекта очистки по органическим загрязнениям на выходе из сооружений биологической очистки на 14 %.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований была решена важная научно-практическая задача повышения эффективности работы сооружений биологической очистки городских сточных вод путем научного обоснования и разработки метода выбора технологического режима работы аэротенка.

Выполненный анализ существующих методов очистки городских сточных вод показал, что, несмотря на разнообразие существующих технологических схем, методов и сооружений, до сих пор полностью не решены вопросы доведения качества очистки до показателей не превышающих допустимые.

Анализ направлений повышения качества очистки сточных вод показал, что одним из актуальных направлений повышения эффективности работы сооружений биологической очистки является регулирование соотношения «сточная вода – активный ил» путем выбора режима работы аэротенка при конкретных условиях его эксплуатации.

Обосновано научное положение о том, что для учета конструктивных особенностей сооружений, участвующих в процессе биологической очистки сточных вод, необходимо разделить процесс биологической очистки в системе «аэротенк – вторичный отстойник» на четыре отдельные составляющие (фазы). Это позволяет учесть особенности процесса, связанные с наличием регенератора, с рассредоточенным поступлением сточных вод в аэротенк, с изменением интенсивности аэрации на разных этапах очистки.

Впервые предложено при описании изменения концентрации активного ила в процессе очистки рассматривать отдельно составляющие активного ила: дисперсные бактерии и хлопья. Это позволяет учесть разные скорости протекания процесса биологической очистки при изменении концентрации составляющих активного ила (хлопьев и дисперсных бактерий).

На основании выявленных закономерностей дальнейшее развитие получила математическая модель процесса биологической очистки в системе «аэротенк – вторичный отстойник», описывающая изменение концентраций составляющих активного ила (хлопьев, дисперсных бактерий), органических загрязнений и продуктов автолиза. При ее решении получена количественная оценка концентраций хлопьев, дисперсных бактерий и загрязнений, соответствующих действующим сооружениям.

В результате математической обработки экспериментальных данных, полученных в результате проведения исследований в регенераторе аэротенка, установлена зависимость концентрации активного ила на выходе из регенератора от концентрации ила, поступающего на регенерацию, и от его расхода, что позволяет прогнозировать дозу ила на выходе из регенератора.

Основываясь на данных, полученных при проведении экспериментальных исследований во втором–четвертом коридорах аэротенка и вторичном отстойнике, получена зависимость концентрации загрязнений в очищенной воде на выходе из сооружений биологической очистки от дозы ила, концентрации загрязнений в поступающих на очистку сточных водах и от их расхода,

что позволяет определить качество очистки сточных вод после биологической очистки.

Проверка адекватности полученных эмпирических зависимостей концентрации активного ила на выходе из регенератора и концентрации загрязнений в очищенной воде на выходе из сооружений биологической очистки по критерию Фишера при 5 % уровне значимости показал, что в рамках проведения эксперимента уравнения адекватно описывают процесс биологической очистки сточных вод.

Полученная в результате научно-теоретического анализа и экспериментальных исследований математическая модель процесса биологической очистки сточных вод и эмпирические зависимости позволили разработать метод выбора технологического режима работы аэротенка при очистке городских сточных вод.

Использование предложенного метода выбора технологического режима работы аэротенка при очистке городских сточных вод позволяет контролировать состояние процесса биологической очистки сточных вод на разных этапах очистки в аэротенке; использовать в качестве контролирующих параметров показатели качества сточных вод, поступающих на очистку (концентрацию органических загрязнений); расход сточных вод, поступающих на очистку; показатели качества активного ила; использовать полученные данные лабораторных анализов для принятия решения об изменении режима подачи стоков на очистку; повысить эффективность биологической очистки сточных вод.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Регіональні доповіді про стан навколишнього природного середовища у 2008 році. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.menr.gov.ua/content/category/78>
2. Стан довкілля в Україні (четвертий квартал 2009 року). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.menr.gov.ua/content/article/6012>
3. Перелік 100 об'єктів, які є найбільшими забруднювачами довкілля в Україні. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.menr.gov.ua/content/article/201>
4. Екологічний паспорт Харківської області (2009 р.). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.menr.gov.ua/content/article/5993>
5. Путилов А.В. Охрана окружающей среды / А. В. Путилов, А. Л. Копреев, Н. В. Петрухин – М.: Химия, 1991 – 224 с.
6. Постанова Верховної Ради України "Про основні напрями державної політики України у галузі охорони довкілля, використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки" від 5 березня 1998 року № 188/98-ВР // Відомості Верховної Ради України, 1998 р. – № 38. – Ст. 248.
7. Білявський Г.О. Основи загальної екології / Г. О. Білявський, М. М. Падун, Р. С. Фурдуй. – К.: Либідь, 1993. – 303 с.
8. Метелев В.В. Водная токсикология / В. В. Метелев, А. И. Канаев, Н. Г. Дзасохова. – М.: Колос, 1971. – 246 с.
9. Беспаятнов Г.П. Предельно допустимые концентрации веществ в окружающей среде / Г.П. Беспаятнов, Г.П. Кротов. – Л.: Химия, 1985. – 528 с.
10. СанПиН № 4630–88 Охрана поверхностных вод от загрязнений. – М.: Стройиздат, 1988. – 119 с.
11. СНиП 2.04.03–85 Канализация. Наружные сети и сооружения / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 72 с.
12. Справочное пособие к СНиП 2.04.03–85. Проектирование сооружений для очистки сточных вод. – М: Стройиздат, 1990. – 273 с.
13. Наказ Держбуду України «Про затвердження правил приймання стічних вод підприємств у комунальні та відомчі системи каналізації населених пунктів України» від 19 лютого 2002 року №37 // Офіційний вісник України, 2002 р. – № 19. – С.52, ст.968.
14. Постанова Кабінета Міністрів України «Про затвердження правил охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами» від 25 березня 1999 року № 465 // Офіційний вісник України, 1999 р. – № 13. – С.34.
15. Охрана окружающей среды / Под ред. Г.В. Дуганова. – Киев: Вища школа, 1998. – 304 с.
16. Эпоян С.М. Очистка сточных вод: от теории к практике / С. М. Эпоян // Украина. Кращі підприємства. – 2007. – Вип.3/16. – С.24-25.

17. Душкин С.С. Улучшение технологии очистки природных и сточных вод. / С.С. Душкин. – К.: Вища школа, 1998. – 148 с.

18. Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод. / С.В. Яковлев, Ю.В. Воронов. – М.: АСВ, 2002. – 704 с.

19. Синьов О.П. Интенсифікація роботи і реконструкція каналізаційних очисних споруд: [навчальний посібник] / О.П. Синьов. – К.: ІСДО, 1994. – 136 с.

20. Ливке В.А. Биологическая очистка промышленных и городских сточных вод / В.А. Ливке // Хімічна промисловість України. – 2000. – №1-2. – С. 88-93.

21. Грицина О.О. Моделирование кинетики очищения стічних вод в аэротенку зонного типа / О.О.Грицина, А.М.Гироль // Науковий вісник будівництва. – Х.: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2011. – № 65. – С. 353-359.

22. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод: підручник / [А.К. Запольський, Н. А. Мішкова-Клименко, І. М. Астрелін, М. Т. Брик та ін.] – К.: Лібра, 2000. – 552 с.

23. Юрченко В.А. Нормирование концентрации азотсодержащих соединений при приеме сточных вод в городскую канализацию / В.А. Юрченко, И.В. Коринько // Коммунальное хозяйство городов. – К: “Техніка”. – 2010. – № 93. – С.58-61.

24. Луценко Г.Н. Физико-химическая очистка городских сточных вод / Г.Н. Луценко, А. И. Цветкова, И. Ш. Свердлов. – М.: Стройиздат, 1984. – 89 с., ил.

25. Недопёкин Ф.В. Экологическая проблема очистки сточных вод аэрацией / Ф.В. Недопёкин, В.В. Дрёмов, Н.И. Куликов // Вісник Донецького національного університету. Сер. А: природничі науки. – 2008. – Вип. 2. – С. 471-473.

26. Henze M. Wastewater treatment / M. Henze. – Technomic Publishing AG, 2002. – 430 p.

27. Хенце М. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван; Пер. с англ. – М.: Мир, 2006. – 480 с.

28. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н. С. Жмур. – М.: Акварос, 2003. – 512 с.

29. Синев О.П. Интенсификация биологической очистки сточных вод / О.П.Синев. – К.: Техніка, 1983. – 110 с., ил.

30. Ковальчук В.А. Очистка стічних вод: Навчальний посібник. / В.А. Ковальчук. – Рівне: ВАТ «Рівненська друкарня». – 2003. – 622 с.

31. Пат. 62697 Україна, МПК (2011/01) C02F 3/00 Спосіб керування процесом подачі господарсько-побутових стоків на установки глибокого біологічного очищення стічних вод / Картавцев М.М., Рогожа Г.А.; власник патенту ХДАУ. – № u201101639; заявл. 14.02.2011; опубл. 12.09.2011, бюл. №17.

32.Pat. № 7517454, US, IC C02F 3/00, US Classification 210/620 210/483 210/767 Method for treating wastewater containing active sludge / Inventors Hu; Yen-Jung Chen; Hsi-Yu Hwang; Wen-Chun. Attorney/Law Firm Bliss McGlynn, P.C. – № 11/879,874; Filed July 19, 2007; Published April 14, 2009.

33. Пат. 55615 А Україна, МПК (2006) G05D 11/00 Спосіб керування процесом біологічного очищення стічних вод в аеротенках і вторинних відстійниках і система для його реалізації / Горбенко В.М., Гліке А.П., Грищенко А.З., Трухан С.П., Іванько А.Г., Крючкова В.А., Єрмолаєва Г.В.; власник патенту Держ. наук.-виробн. підпр. «Науково-інженерний центр автоматизації» наукова корпорація «Київський інститут автоматики». – № 2001129137; заявл. 27.12.2001; опубл. 15.04.2003, бюл. № 4.

34. Пат. 000912 В1, Евразийское патентное ведомство, МПК⁷ С 02F 3/12, 3/20, 3/30. Способ очистки отходов и устройство для его осуществления / Горонси Мервин Чарльз; заявитель и патентообладатель Бисаско ПТИ, ЛИМИТЕД. – № 199800076; заявл. 21.06.1996; опубл. 26.06.2000.

35.Pat. 7527735, US, IC C02F 3/00, US Classification 210/605 System for treating wastewater / Inventors Brase, Крэйг С., Attorney/Law Firm Kinney & Lange, P.A. – № 11/507,124, Filed August 21, 2006 Published May 5, 2009.

36. Пат. № 2033973 С1, Россия, МПК⁶ С02F3/02, G05D27/00 Способ управления процессом очистки сточных вод / Закиров Д.Г., Петрушевский В.Е., Хусаенов Р.М., Пушников Ю.И.; патентообладатель Научно-исслед. и проектно-констр. институт охраны окружающей среды в угольной промышленности. – № 5031549/26; заявл. 25.07.1991; опубл. 30.04.1995.

37. Пат. № 2 440 306 С1, Россия, МПК С02F3/30, С02F101/16, С02F103/04 Способ обеспечения надежности очистки сточных вод от соединений азота и фосфора / Васильев Б.В., Трухин Ю.А., Рублевская О.Н., Ильин Ю.А., Игнатчик В.С., Игнатчик С.Ю.; патентообладатель Государственное Унитарное Предприятие «Водоканал Санкт-Петербурга». – № 2010124223/05; заявл. 11.06.2010; опубл. 20.01.2012, бюл. №2.

38. Пат. № 2 415 086 С1, Россия, МПК С02F3/02 Способ повышения эффективности биологической очистки химически загрязненных сточных вод / Кирсанов В.В., Кудряшов В.Н., Гафуров Р.Р., Хузаянов Р.Х., Смолко А.А., Гицарева Е.А.; патентообладатель Казанское акционерное общество «Органический синтез» (ОАО «Казаньоргсинтез»). – № 2009114004/05; заявл. 13.04.2009; опубл. 20.10.2010, бюл. №29.

39.Pat. № 7585414, US, IC C02F 3/00, US Classification 210/620 Water treatment by activated sludge / Invertors Kishi; Hiroshi. Attorney/Law Firm Ostrolenk Faber LLP. – № 10/586,889 874; Filed January 20, 2005; Published September 8, 2009.

40. Monod J. L'évolution microscopique. / J. Monod. – "Theoria to Theory", Gordon and Breach Science Publishers Ltd. – 1977. – № 10. – P. 303-311.

41. Herbert D. A theoretical analysis of continuous culture systems / D. Herbert // In: Symp. Of continuous of microorganisms. – 1960. – L., 1961. – Sc. I, monogr. N 12. – P. 44-52.

42. Modeling fecal coliform bacteria-II. Model development and application. /Canale R.P.; Auer M.T.; Owens E.M.; Heidtke T.M.; Effler S.W. // *Water Research*. –vol. 27, 4 April, 1993. – P. 703-714.
43. Иерусалимский Н.Д. Основы физиологии микробов / Н. Д. Иерусалимский. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 244 с.
44. Гюнтер Л.И. К выбору математической модели процесса биохимической очистки сточных вод / Л.И. Гюнтер, Б.С. Запрудский // *Микробиологическая промышленность*. – 1971. – №5 – С. 14-18.
45. Вавилин В.А. Обобщенная модель и механизм аэробной биологической очистки / В.А. Вавилин // *ДАН СССР*. – 1981. – т.258, №5. – С. 1269 – 1273.
46. Вавилин В.А. Обобщенная модель аэробной биологической очистки / В.А. Вавилин. // *Водные ресурсы*. – 1982. – № 4. – С. 136-148.
47. Вавилин В.А. Сравнительная оценка математических моделей, применяемых для расчета аэротенков // В.А. Вавилин, В.Б. Васильев // *Водные ресурсы*. – 1981. – № 4. – С.132-145.
48. Брагинский Л. Н. Моделирование аэрационных сооружений для очистки сточных вод / Л.Н. Брагинский, М.А. Евилевич, В.И. Бегачев. – Л.: Химия, 1980. – 144 с.
49. Охримюк Б.Ф. математична модель біологічного очищення стічних вод від органічних речовин і сполук азоту активним мулом із змішаними мікробними культурами в секційному аеротенку / Б.Ф. Охримюк, О.О. Грицина // *Вісник НУВГП*. – Рівне, 2007. – № 4(40). – С. 527-536.
50. Viloría Y. Sensitivity Analysis of the UNO Activated Sludge Model / Y. Viloría // *University of New Orleans. Theses and Dissertations*. –2007. – 92 p.
51. Конончук Р.М. Моделирование системы очистки аэротенк–вторичный отстойник–регенератор / Р.М. Конончук // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. – 1999. – №1-2. – С. 102-105.
52. Олійник О.Я Особливості моделювання очистки стічних вод у системі аеротенк–відстійник–регенератор / О.Я. Олійник, С.М. Зябліков // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. – 2005. – №4. – С. 46-53.
53. Freedman H. Persistence in predator-prey systems with ratio-dependent predator influence / Freedman H., Mathsen R. // *Journal: Bulletin of Mathematical Biology*. – 1993. – Vol. 55, № 4. – P. 817-827.
54. W. Gujer Microscopic versus macroscopic biomass models in activated sludge systems. / Gujer W. // *Water Science & Technology*. – IWA Publishing. – 2002. –Vol. 45, № 6. – P. 1-11.
55. Котин В.В. Моделирование кинетики биохимической очистки промышленных сточных вод / В.В. Котин, А.В. Артемов // *Инженерная экология*. – 2000. – №3. – С. 38-47.
56. Вавилин В.А. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом / В.А. Вавилин, В.Б. Васильев. – М.: Наука, 1979. – 119 с.

57. Вавилин В.А. Нелинейные модели биологической очистки и процессов самоочищения в реках / В.А. Вавилин. – М.: Наука, 1983. – 158 с.
58. Большаков Н.Ю. Оценка эффективности системы аэротенк – вторичный отстойник методом математического моделирования / Н. Ю. Большаков // Вестник молодых ученых. – 2001. – №7 – С. 58-67.
59. Колмогоров А.Н. Избранные труды. II том: Теория вероятностей и математическая статистика / [отв. ред. Прохоров Ю.В., сост. Ширяев А.Н.] – М.: Наука, 1986. – Т.2. – 534 с.
60. Свирежев Ю.М. Устойчивость биологических сообществ / Ю.М. Свирежев, Д.О. Логофет. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
61. Логофет Д.О. Устойчивость в моделях взаимодействующих популяций / Д.О. Логофет, Ю.М. Свирежев // Проблемы кибернетики. – М.: Наука. – 1977. – Вып.32. – С. 187-201.
62. Базыкин А.Д. Математическая биофизика взаимодействующих популяций / А.Д. Базыкин. – М.: Наука, 1985. – 182 с.
63. Rosenzweig M.L. Preston's ergodic conjecture: The accumulation of species in space and time / M.L. Rosenzweig // Biodiversity dynamics. – 1998. – P. 311-348.
64. Agyemang I. An environmental model for the interactions of industry with two competing agricultural resources. / I. Agyemang, H. I. Freedman // Mathematical and Computer Modelling. – 2009. – № 49 (7-8). – P. 1618-1643.
65. Горносталь С.А. Анализ математических моделей процессов биологической очистки сточных вод. / С.А. Горносталь, А.П. Созник // Проблемы надзвичайних ситуацій. Х.: УЦЗУ. – 2007. – Вип. 6. – С.121-127.
66. Созник А.П. Анализ моделей, описывающих процессы биологической очистки сточных вод / А.П. Созник, С.А. Горносталь, Е.А. Петухова // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации: сборник материалов межд. науч.-прак. конф. – Гомель: ГИИ МЧС РБ, 2010. – С.185 – 186.
67. Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование / В. Вольтерра. – М.: Наука, 1976. – 288 с.
68. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 / M. Henze, W. Gujer, T. Mino, M. van Loosdrecht // Published by IWA Scientific and Technical Report No. 9. – London, June 2000. – P. 130.
69. The Eawag Bio-P Module for Activated Sludge Model / Rieger L., Koch G., Kuhni M., Gujer W., Siegrist H. // J. Water Res. – 2001. – 35(18). – P. 3887-3903.
70. Simulating Activated Sludge System by Simple-to-Advanced Models / H. Shahriari, C. Eskicioglu, R.L. Droste // Journal of Environmental Engineering. – 2006. – 132(1). – P. 42–50.
71. Application of the International Water Association activated sludge models to describe aerobic sludge digestion. / M.Ghorbani, C. Eskicioglu. // Environmental Technology. – 2011. – 32(16). – P. 1923-1938.
72. Таубе П. Р. Химия и микробиология воды / П. Р. Таубе, А. Г. Баранова. – М.: Высшая школа, 1983. – 280 с.

73. Панкратова С.А. Математическое моделирование и управление качеством сточных вод / Панкратова С.А., Емельянов В.М., Сироткин А.С., Шулаев М.В. // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 6. –

С. 76-85.

74. Назарова Р. І. Хімія та мікробіологія води / [Назарова Р. І., Коновалов О. Н., Уманська Т. І. та ін.] – Харків: «Консум», 2007. – 246 с.

75. Реконструкция и интенсификация сооружений водоснабжения и водоотведения: [учебное пособие] / [А.А.Василенко, П.А.Грабовский, Г.М.Ларкина и др.]. – Киев–Одесса, КНУСА, ОГАСА, 2007. – 307 с.

76. Возная Н. В. Химия воды и микробиология. / Н.В. Возная. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Высшая школа, 1979.– 314 с.

77. Унифицированные методы анализа вод./ Под ред. Ю.Ю. Лурье. – Изд. 2-е. – М.: Химия, 1973. – 363с.

78. Смирнов Н.В. Математическое моделирование процесса биологической очистки сточных вод /Н.В. Смирнов // Ярославский педагогически вестник. – 2012. – Т.3. – № 3. – С.44-49.

79. Приходько Л.Н. Теоретические предпосылки возможности увеличения производительности действующих канализационных очистных станций (КОС) без строительства дополнительных емкостных сооружений. / Л.Н. Приходько //Вісник ДДАБА. – Макіївка: ДДАБА. –2000. –Вип.3(23). – С.12-13.

80. Олійник О.Я. Математичне моделювання процесу денітрифікації у спорудах по типу коридорних аеротенків / О.Я. Олійник, О.В. Поліщук, Ю.І. Калугін // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.:КНУБА. – 2007. – Вип.8. – С. 67-78.

81. Синев О.П. Расширение и реконструкция очистных сооружений / О.П. Синев, А.И. Мацнев, А.П. Игнатенко. – К.: Будівельник, 1981. – 44 с.

82. Юрченко В.А. Развитие научно-технологических основ эксплуатации сооружений канализации в условиях биохимического окисления неорганических соединений: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.04 / Юрченко Валентина Александровна. – УГНИИ „УкрВОДГЕО”. – Харьков, 2007. – 426 с.

83. Карюхина Т.А. Химия воды и микробиология / Т.А. Карюхина, И.Н. Чурбанова. – М.: Стройиздат. – 1995. – 208 с.

84. Шарифуллин В.Н. Интенсификация биологической очистки стоков / В.Н. Шарифуллин, Р.М. Конончук, Н.Н. Зиятдинов // Промышленная экология и проблемы безопасного будущего. – Казань: Татполиграф. – 1998. – С. 101-102.

85. Святенко А.І. Важливість урахування особливостей біологічного очищення в аеротенках для поліпшення показників їх роботи / А.І. Святенко, Л.М. Корнійко // Екологічна безпека. – 2009. — №4 (8). – С. 93—96.

86. Таварткіладзе І. М. Розрахунок балансового рівняння для визначення віку біоценозу / І. М. Таварткіладзе, М.В. Федорець, В.К. Чібірков //

Науково-практичні проблеми моделювання та прогнозування надзвичайних ситуацій. – Київ. – 2002. – №5. – С.115 – 118.

87. Eikelboom D.H. Scum formation in carrousel treatment plants / In Proc. Of the IAWPRC Specialized Seminar on Interactions of Wastewater, Biomass and Reactor Configurations in Biological Treatment Plants, 21–23 August 1991/ – Copenhagen, paper no. 24, 1991a.

88. Eikelboom D. H. Process Control of Activated Sludge Plans by Microscopic Investigation / D. H. Eikelboom. – IWA Publishing, 2000. – 155 p.

89. Ratnaweera H. Simulation program for wastewater coagulation / H. Ratnaweera, L. Lei, O. Lindholm // Water Science and Technology/ – IWA Publishing, 2002. – Vol. 46. – № 4-5. – p. 27–33.

90. Activated sludge process design and control: theory and practice / Edited by W.W. Eckenfelder, P. Grau. – Technomic Publishing AG, 1992. – 267 p.

91. Eckenfelder W. W. Activated sludge treatment of industrial wastewater / W.W. Eckenfelder, J. L. Musterman. – Technomic Publishing AG, 1995. – 281 p.

92. Orhon D. Modeling of activated sludge systems / D. Orhon, N. Artan. – Technomic Publishing AG, 1994. – 589 p.

93. Мурыгина В.П. Роль нитчатых микроорганизмов в процессах пенообразования на сооружениях очистки сточных вод / В.П. Мурыгина, С.В. Калюжный // Успехи современной биологии. – 2004. –Т. 124, № 1. – С. 77 - 92.

94. Епоян С.М. Технологія очистки сточних вод що скидаються у водні об'єкти від сполук азоту / С. М. Епоян, С. С. Фомін, Н. С. Горбань, М. М. Аскретков, Н. Ю. Ревякіна // Науковий вісник будівництва. – Х.: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – 2008. – Вип. 50. – С.139-146.

95. Олійник О.Я. До розрахунку вторинних відстійників / О.Я. Оліник, С.М. Зябликов, Н.Г. Степова // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.:КНУБА, 2004. – Вип.3. – С. 44-55.

96. Жуков А. И. Методы очистки производственных сточных вод: справочное пособие / А. И. Жуков, И. Л. Монгайт, И. Д. Родзиллер; под ред. А. И. Жукова. – М.: Стройиздат, 1977. – 208 с.

97.Калюжный С.В. Анаэробная биологическая очистка сточных вод / С.В. Калюжный, Д. А., Ножевникова // Итоги науки и техники. – М.: ВИНТИ.– 1991. – Т. 29.– 187с.

98. Эпоян С.М. Интенсификация процессов очистки городских сточных вод и обработки осадков; дис. ... доктора техн наук: 05.23.04 / Эпоян Степан Михайлович. – Харьков, 1997. – 319 с.

99. Пантелят Г.С. Теоретические аспекты интенсификации очистки городских сточных вод / Г.С. Пантелят, С.М. Эпоян // Водоснабжение и санитарная техника. – 1996. – № 10. – С. 11-12.

100. Juang D. F. Microbial population structures in activated sludge before and after the application of synthetic polymer / D. F. Juang, L. J. Chiou // Int. J. Environ. Sci. Tech. – 2007. – V. 4, № 1. – P. 119-125.

101. Patziger M. Analysing sludge balance in activated sludge systems with a novel mass transport model. / M. Patziger, H. Kainz, M. Hunze, J. Józsa, // *Water Science and Technology*. – IWA Publishing, London, UK. – 2008. – 57(9). – P. 1413-1419.

102. Горносталь С.А. Описание процессов, происходящих в системе аэротенк – вторичный отстойник, и их физическое моделирование. / С.А. Горносталь, А.П. Созник. // *Коммунальное хозяйство городов*. – К: Техніка. – 2008. – №81 – С.133-139.

103. Очистка хозяйственно-бытовых сточных вод и обработка осадков / А.Ф. Афанасьева, М.Н. Сирота, Л.С. Савельева, А.Н. Эпов. – М.: Изограф, 1997. – 96 с.

104. Rissler S. Effect of horizontal flow on aeration / S. Rissler // *Scientific Impeller*. – № 3, 1995.

105. Tambo N. Physical characteristics of flocks / N. Tambo, H. Hozumi, V. Watanabe // *Water Research*. – 1979. – № 5. – P.13.

106. Шарифуллин В.Н. Процессы сорбции и биоокисления во флокулах активного ила / В.Н. Шарифуллин, Н.Н. Зиятдинов // *Химическая промышленность*. – 2001. – №3. – С. 11-13.

107. Сивак В.М. Аэраторы для очистки природных и сточных вод / В. М. Сивак, Н. Е. Янушевский. – Львов: Вища школа, 1984. – 124 с.

108. Яковлев С.В. Биологические фильтры / С. В. Яковлев, Ю. В. Воронов. – М: «Стройиздат», 1989. – 120с.

109. Запольський А.К. Водопостачання, водовідведення та якість води.: підручник / А. К. Запольський – К.: Вища школа, 2005. – 671 с.

110. Остапени В. П. Очистка сточных вод в биологических прудах / В.П. Остапени. – Минск.: Изд-во НАН Белоруссии, 1992. – 184с.

111. Гіроль М.М. Технологія біологічного очищення стічних вод / М. М. Гіроль, Л. А. Саблій, С. В. Кононцев, Н. О. Омельчук // *Коммунальное хозяйство городов*. - К: Техніка. – 2002. – № 45 – С. 27-30.

112. Бабенков Е. Д. Очистка воды коагулянтами / Е. Д. Бабенков — М.: Наука, 1977. – 356 с.

113. Скирдов И.В. Влияние концентрации активного ила на скорость биохимического окисления / И.В. Скирдов, Е.А. Дмитриева // *Очистка промышленных сточных вод. Труды ВНИИ ВОДГЕО: Сборник*. – 1974. – Вып. 43. – С. 21-23.

114. Шеломков А.С. Расчет сооружений глубокой биологической очистки методом компьютерной имитации / А.С. Шеломков, Ю.Ф. Эль // *ВСТ: Водоснабжение и санитарная техника*. – *Haustech*. – 1999. – №8. – С. 11-13.

115. Андреев С.Ю. Математическое моделирование процессов очистки сточных вод в аэротенках / С. Ю. Андреев, Б. М. Гришин, В. Г. Камбург [и др.] // *Региональная архитектура и строительство*. – Пенза, 2012. – №2. – С.114-120.

116. Созник А.П. Моделирование процессов биологической очистки в аэротенках смешительного типа / А.П. Созник, С.А. Горносталь, Е.А. Петухо-

ва // Строительство, материаловедение, машиностроение. – ГВУЗ ПГАСА. – 2010. – Вып. 52. – С. 24-28.

117. Горносталь С.А. Моделювання процесів біологічного очищення стічних вод для забезпечення екологічної безпеки водних об'єктів / С.А. Горносталь // Сучасні екологічні та енергозберігаючі технології в природокористуванні: Міжн. наук.-прак. конф. молодих вчених і студентів: зб. тез доп. / редкол.: А.М. Тугай та ін. В двох частинах. – ч.2. – К.: КНУБА, 2011. – С. 84-86.

118. Горносталь С.А. Анализ работы аэротенков и пути повышения их экологической безопасности / С.А. Горносталь, А.П. Созник // Вісник Донецького національного університету. – 2010. – Сер. А. Природничі науки. – Вип.2. – С. 274-279.

119. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. / М.С. Винарский, М.В. Лурье. – К.: Техніка, 1975, – 168 с.

120. Большев Л.Н. Таблицы математической статистики. / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука, 1965. – 465 с.

121. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. / Ю.П. Адлер – М.: Металлургия, 1969. – 158 с.

122. Ашмарин И.П. Быстрые методы статистической обработки и планирование эксперимента. / И.П. Ашмарин, Н.И. Васильев, В.А. Амбросов – Л.: Изд-во Лен. Ун-та, 1975. – 78 с.

123. Налимов В.В. Теория эксперимента. / В.В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 207 с.

124. Налимов В.В. Логические основания планирования эксперимента / В.В. Налимов, Т.И. Голиков. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1971. – 72 с.

125. Горносталь С.А. Модель процесса биологической очистки сточных вод в регенераторе аэротенка / С.А. Горносталь // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – 2011. – Вип. 65 – С.360-364.

126. Горносталь С.А. Моделирование процессов биологической очистки в идеальных и реальных аэротенках / С.А. Горносталь // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХНУБА, ХОТВ АБУ. – 2012. – Вип. 69 – С. 287-291.

127. Горносталь С.А. Исследование зависимости концентрации загрязнений в очищенной воде на выходе из аэротенка в процессе биологической очистки / С.А. Горносталь, Ю.В. Уваров // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Х.: НУЦЗУ. – 2011. – Вип. 14 – С. 65-69.

128. Гвоздяк П.І. Біологічні аномалії води, або чотири запитання для обміркування / П.І Гвоздяк. // Вісник НАН України. – 2005. – № 4. – с.45-51.

129. Нестеренко Е.В. Развитие стратегии очистки сточных вод / Е.В. Нестеренко, И.А. Шеренков // Науковий вісник будівництва. – 2009. – Вип. 54. – С.319-323.

130. Нездойминов В.И. Расширение возможности применения биологически очищенных сточных вод в оборотных системах промышленного водоснабжения / В.И. Нездойминов, В.С. Рожков // Вестник ОГАСА. – Одесса. – 2005. – Вып.19. – С.133-137.

131. Повышение эффективности очистки производственных сточных вод полиоксихлоридами алюминия / Н.С. Серпокрылов, Е.В. Вильсон, М.Н. Царева, Т. В. Клименко [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004 – № 1. – с. 30–32.

132. Штонда Ю.И. Интенсификация работы сооружений по очистке городских сточных вод с большим колебанием сезонной производительности: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / Штонда Юрий Иванович. – Харьков, 2009. – 130 с.

133. Николадзе Г.И. Технология очистки природных вод / Г. И. Николадзе – М.: Высшая школа, 1987. — 66 с.

134. Гвоздяк П.И. Научное обоснование, разработка и внедрение в практику новых биотехнологий очистки воды / П.И. Гвоздяк, Л.И. Глоба // Химия и технология воды. – 1998. – Т.20, № 1. – С.61-66.

135. Таршиш М.С. Моделирование на ЭВМ параллельной работы аэротенков–смесителей с учетом неравномерности распределения воды, воздуха и активного ила / М.С. Таршиш, И.В. Скирдов // Химия и технология воды. – 1987. – Т. 9. – № 2. – С. 25-27.

136. Яковлев С.В. Биологическая очистка производственных сточных вод: Процессы, аппараты и сооружения. / [С.В. Яковлев, И.В. Скирдов, В.Н. Швецов и др.]. – М.: Стройиздат, 1985. – 208 с.

137. Горносталь С.А. Реализация метода управления процессом очистки сточных вод в аэротенке / С.А. Горносталь // Науковий вісник будівництва. – Харків; ХНУБА, ХОТВ АБУ. – 2012. – Вип. 68 – С. 415-418.

138. Горносталь С.А. Практическое применение результатов моделирования процесса биологической очистки сточных вод в аэротенке промежуточного типа / С.А. Горносталь, Ю.В. Уваров // Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды: сборник трудов I Межотраслевой науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, 27–28 марта 2012 г., Г Харьков /УкрГНТЦ «Энергосталь». – Х.:УкрГНТЦ «Энергосталь», 2012. – С. 438-441.

139. Пат. 75550 Україна, МПК (2012.01) G05D 27/00 C02F 3/02 Спосіб керування процесом біологічного очищення стічних вод / Горносталь С.А., Петухова Е.А., Уваров Ю.В.; власник патенту Нац. универ. гражд. защиты Украины. – № u201204793; заявл. 17.04.2012; опубл. 10.12.2012, бюл. № 23.

Наукове видання

**Горносталь Стелла Анатоліївна
Петухова Олена Анатоліївна
Уваров Юрій Володимирович**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СПОРУД БІОЛОГІЧНОГО
ОЧИЩЕННЯ МІСЬКИХ СТІЧНИХ ВОД**

Монографія

Російською мовою

Підписано до друку 25.08.15. Формат 60x84/16.
Папір 80 г/м². Друк ризограф. Ум.друк. арк. 6,5.
Тираж прим. Вид. № 15/15. Зам.№ /15. Обл.вид арк. 4,7.
Сектор редакційно-видавничої діяльності
Національного університету цивільного захисту України
61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94
www.nuczu.edu.ua

КП "Міська друкарня", 61002, Харків, ул. Артёма, 44
Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення та радіомовлення
України про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції,
№ 3613 серія ДК від 29.10.2009