

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и инженерной экологии

(наименование института полностью)

Кафедра «Рациональное природопользование и ресурсосбережение»

(наименование кафедры)

18.04.01 Химическая технология

(код и наименование направления подготовки)

Экобиотехнология

(направленность(профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Моделирование системы биологической очистки сточных вод на  
городских очистных сооружениях

Студент

Е.Д. Гирявец

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

М.В. Кравцова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Руководитель

программы

к.х.н., д.т.н., доцент, С.В. Афанасьев

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой

к.п.н., доцент, М.В. Кравцова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018г.

Тольятти 2018

## Оглавление

Введение	4
Глава 1 Анализ существующих методов биологической очистки сточных вод на городских очистных сооружениях	7
1.1 Теоретический анализ применения биологического метода для очистки городских сточных вод	7
1.1.1 Аэротенк	15
1.1.2 Вторичный отстойник	16
1.1.3 Регенератор	17
1.1.4 Особенности состава сточных вод	19
1.2 Требования к качеству очистки	20
1.3 Особенности биологической очистки стоков городских сточных вод на примере очистных сооружений г.о. Жигулевск	24
1.3.1 Гидробиологический состав биомассы активного ила	26
1.3.2 Свойства биоценоза	31
1.3.3 Процесс окисления загрязнений активным илом	33
1.3.4 Факторы, определяющие удовлетворительную работу аэротенков	38
Выводы по 1 главе	43
Глава 2 Составление и анализ математической модели биологической очистки сточных вод	44
2.1 Математическое описание гидродинамики потоков в сооружениях биологической очистки	48
2.1.1 Решение математической модели	51
2.2 Математическое описание кинетики удаления загрязнений и роста биомассы	57
2.3 Практическое использование математической модели при очистке сточных вод	70

Выводы по 2 главе	77
Заключение	79
Список используемых источников	80

## Введение

Производственные мощности промышленных предприятий увеличиваются с каждым днем, городское население растет, укрупняются источники загрязнения компонентов природной среды, в том числе гидросферы, расширяется перечень загрязняющих веществ, поступающих в неё ежечасно. Защита окружающей природной среды сточными водами представляет острую научно-техническую проблему современного мира.

Многочисленный мониторинг процессов самоочищения некоторых водных объектов индустриальных районов показывает, что оно может удалить таким путем только треть всех поступающих загрязнений.

Основной задачей в рамках решения этой проблемы является обеспечение показателей очистки, заданным природоохранным законодательством. В связи с этим возникает необходимость постоянного совершенствования систем очистки. Пока допустимый уровень очистки не будет достигнут, выбранная тема будет актуальна.

### **Актуальность темы исследования:**

1. Сброс сточных вод городских очистных сооружений г.о. Жигулевск осуществляется в Саратовское водохранилище, вода которого определяется как «загрязненная».

2. Действующие очистные сооружения не обеспечивают должный уровень качества очистки, стоки на выходе не удовлетворяют заданным законодательством требованиям.

3. Нагрузка на очистные сооружения неуклонно возрастает, также система очистки подвержена воздействию залповых сбросов предприятий-абонентов, которые могут вывести её из равновесия.

### **Проблема исследования:**

Недостаточный уровень качества очистки сточных вод на городских очистных сооружениях, увеличение антропогенного влияния на Саратовское водохранилище.

### **Объект исследования:**

Процесс очистки сточных вод на городских очистных сооружениях ООО «СамРЭК-Эксплуатация».

### **Предмет исследования:**

Этап биологической очистки на городских очистных сооружениях ООО «СамРЭК-Эксплуатация».

### **Цель исследования:**

Снижение антропогенного влияния на Саратовское водохранилище за счет повышения эффективности очистки стоков, обеспеченной совершенствованием блока биологических очистных сооружений г.о. Жигулевск.

### **Задачи исследования:**

1. Провести анализ особенностей биологической очистки и проблемы снижения качества очистки сточных вод на данном этапе.
2. Предложить систему регулирования качества очистки стоков для биологического этапа при использовании методов моделирования.

### **Научная новизна исследования**

Состоит в использовании методов математического моделирования для регулирования качества стоков биологического этапа и их очистки.

### **Теоретическая значимость исследования**

Состоит в представлении детализированного анализа процесса биологической очистки сточных вод на городских очистных сооружениях, определении особенностей очистки на основе современного опыта и ведущих научных школ, выявлении факторов, способных обеспечить удовлетворительную жизнеспособность активного ила. Представление

математического подхода использования методов математического моделирования для биологической очистки стоков.

**Практическая значимость исследования:**

Представлено техническое решение, обеспечивающее контроль параметров поступающих на очистку стоков и своевременное устранение повышенных концентраций загрязняющих веществ, что способствует увеличению стабильности исследуемой системы.

**Защищаемые положения:**

Система регулирования качества очистки стоков для биологического этапа при использовании методов моделирования

**Структура магистерской диссертации:**

Обусловлена логикой и последовательностью изложения результатов решения задач исследования. Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения, списка использованных источников, включающего 65 наименований. Объем работы составляет 86 страниц машинописного текста, содержит 31 рисунок, 9 таблиц.

# **Глава 1 Анализ существующих методов биологической очистки сточных вод на городских очистных сооружениях**

## **1.1 Теоретический анализ применения биологического метода для очистки городских сточных вод**

Основные схемы очистных сооружений были описаны еще в 1949 году профессором, доктором технических наук Б.О. Ботуком. В своей книге «Очистка бытовых сточных вод» он описывает первые лабораторные исследования по использованию аэротенка для биологической очистки стоков, проведенные в 1912 году. Сточную жидкость предварительно осветляли, затем прибавляли к ней культуру специфических микроорганизмов, специально выращенных для этой цели. Затем смесь интенсивно аэрировали в течение определенного промежутка времени, после чего спускали в реку в очищенном состоянии. Также он указал, что на состав биоценоза активного ила определяющее влияние оказывает состав сточной воды, её параметры и способы обработки [5].

Авторами статьи «Формирование, очистки и использование сточных вод» было дано следующее определение процессу биологической очистки: «Биологическая очистка предполагает очистку растворенной части загрязнений сточных вод (органические загрязнения - ХПК, БПК; биогенные вещества - азот и фосфор) специальными микроорганизмами (бактериями и простейшими) или дождевыми червями, которые называются активным илом или биопленкой» [11].

Ц.И. Роговская в своем труде 1967 года «Биохимический метод очистки производственных сточных вод» пишет о развитии промышленности, в частности химической, и изменениях в составе сточных вод, повлекшие за собой изменения состава и особенностей биоценозов активного ила. Недопустимо осуществлять сброс в водоемы неочищенных производственных сточных вод, необходимо интенсифицировать процесс

очистки. Для осуществления регулирования процесса очистки в желательном направлении определяющую роль играют данные, описывающие состав и физиологические особенности микроорганизмов, непосредственно осуществляющих процесс биологической очистки. Необходимо наличие информации также об условиях, в которых минерализаторы будут чувствовать себя наиболее комфортно, быстро перерабатывать органические вещества, находящиеся в стоках. Располагая этой информацией можно ускорить и удешевить процесс биологической очистки [42].

Также автором приведены предельно допустимые концентрации некоторых соединений для адаптированной микрофлоры при поступлении их на аэробные очистные сооружения, работающие на полную очистку. Данные отражены в таблице 1.

Таблица 1 - Предельно-допустимые концентрации соединений, оказывающих влияние на биохимические процессы в очистных сооружениях (по данным ВНИИ Водгео) [8]

Соединения	Концентрация в мг/л при очистке сточных вод, не более		Автор
	в аэротенке - смесителе	в биофильтре	
1	2	3	4
Бензол	100	-	Шнеерсон М.М.
Толуол	200	-	Шнеерсон М.М., Гельцер Ю.Г.
Хлорбензол	10	-	Базякина Н.А.
Тринитротолуол	12	-	Шнеерсон М.М.
Спирты:			
метилловый	-	700	Базякина Н.А.
бутиловый	-	420	
Глицерин	500	-	
Уксусноэтиловый эфир	-	500	Шнеерсон М.М.
Формальдегид	100	300	Роговская Ц.И. и др
Кротоновый альдегид	400*, 600*	250	
Атетатальдегид	750	-	
Ацетон	750	-	
Кислоты:			



Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
Стеариновая	-	300	Базякина Н.А.
Масляная	-	500	Шнеерсон М.М.
Бензойная	-	150	
Анилин	230	-	Умнова А. Д.
Фенол	1000	-	Базякина Н.А., Роговская Ц.И.
Резорцин	500	-	Роговская Ц.И.
Гидрохинон	15	-	Базякина Н.А.
Цирокатехин	100	-	Шнеерсон М.М.
Некаль	100	-	Калабина М.М., Шнеерсон М.М.
Нефтепродукты	50	-	Ковалева Н.Г.

\* Очистка с бытовыми водами

\*\* Очистка без бытовых вод

В 1977 году в справочном пособии «Методы очистки производственных сточных вод» авторами (А.И. Жуков, И.Л. Монгайт, И.Д. Родзиллер) было отмечено, что для биологической очистки больших объемов сточных вод чаще всего используют аэротенки различных видов, одним из важных достоинств которых является возможность эффективно влиять на скорость и полноту протекающего в них процесса биохимического окисления. Т.о. процессы, происходящие в аэротенке, являются управляемыми [23].

Аэротенки-вытеснители применяют при очистке стоков, концентрация БПК которых не превышает 500 мг/л, для более концентрированных сточных вод, особенно с резко колеблющимся составом, наиболее часто применяют аэротенки-смесители. В этом типе сооружений выше эффективность очистки и подаваемый воздух используется более полно ввиду их конструкции, которая подразумевает децентрализованный впуск сточной жидкости и активного ила. Обеспечивается практически полное выравнивание скорости потребления кислорода во всех точках.

Приведена зависимость продолжительности аэрации от  $BPK_{полн}$  сточной воды (рисунок 1) [23].

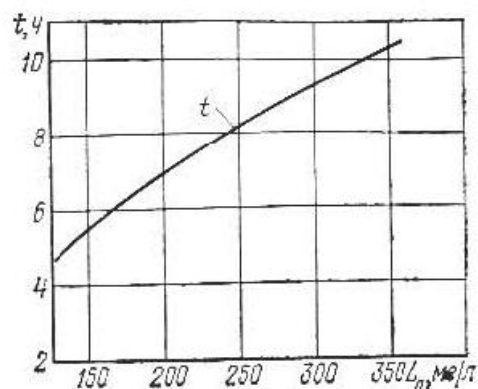


Рисунок 1- Зависимость продолжительности аэрации  $t_{от}$  БПК<sub>полн</sub> сточной воды  $L_0$

Данную зависимость можно применять в том случае, если поступающие на очистку производственные сточные воды не содержат токсичных веществ.

При рассредоточенном впуске сточных вод в аэротенк продолжительность аэрации находится из уравнения [23]:

$$t = \frac{15 \cdot L_a}{T \cdot \rho}, \quad (1)$$

где  $T$  - среднегодовая температура сточных вод;  $\rho$  – скорость окисления при полной очистке сточных вод (конечная БПК<sub>полн</sub>=15 мг/л).

Протекающие на биологических очистных сооружениях процессы наиболее детально описаны Натальей Сергеевной Жмур в монографии «Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками» [20]. Популярно описан процесс биологической деградации загрязняющих веществ. Наиболее предпочтительной конструкцией аэротенков для очистки сточных вод, содержащих стоки производственного происхождения, являются аэротенки-вытеснители. Автором определены ключевые параметры, определяющие комфортную жизнедеятельность микроорганизмов биоценоза, от которого напрямую зависит уровень очистки.

Также автором отмечено, что при эксплуатации биологических очистных сооружений необходимо большое внимание уделять поддержанию

правильного соотношения дозы активного ила в аэротенках и поступающих на очистку загрязняющих веществ. Определен оптимальный рубеж дозы ила, при превышении которого могут наблюдаться такие неблагоприятные явления как снижение концентрации растворенного кислорода, влекущее за собой залеживание и загнивание ила при отстаивании, повышенный вынос из вторичных отстойников. Перечисленные факторы неизбежно вызывают ухудшение качества очистки стоков. При нарушении соотношения между концентрацией загрязняющих веществ в поступающем стоке и рабочей дозой активного ила страдает наиболее важный показатель состояния биоценоза – иловый индекс возрастает из-за нарушения седиментационных свойств. Допускается варьирование значений илового индекса в пределах значений от 60 до 150 см<sup>3</sup>/г. Также на удовлетворительные условия жизнедеятельности ила и удовлетворительный режим эксплуатации сооружений указывает стабильность значений илового индекса [20].

Доказана важность правильной аэрации иловой смеси. Наиболее удачным вариантом признана среднепузырчатая аэрация, которая обеспечивает идеальный эффект одновременного насыщения иловой смеси кислородом и удовлетворительного массообмена в хлопьях ила [20].

В таблице 2 приведены уравнения, предложенные автором для расчета основных показателей биологической очистки.

Таблица 2 - Расчет показателей биологической очистки [20]

Показатель биологической очистки	Уравнение	Переменные
1	2	3
Иловый индекс I, см <sup>3</sup> /г	$I = \frac{V}{d}$	V - значение дозы ила по объему, см <sup>3</sup> /дм <sup>3</sup> ; d - количественное значение дозы ила по сухой массе, г/дм <sup>3</sup>
Период аэрации T, ч	$T = \frac{W}{q}$	W - объем аэрируемых сооружений, м <sup>3</sup> ; q - часовой расход сточных вод, м <sup>3</sup> /ч.

Продолжение таблицы 2

1	2	3
Расход воздуха на очистку $1 \text{ м}^3$ сточных вод $D_{1\text{м}^3}$ , $\text{м}^3/\text{м}^3$	$D_{1\text{м}^3} = \frac{D_{\text{ср.сут}}}{Q_{\text{ср.сут}}}$	$D_{\text{ср.сут}}$ - среднесуточный расход воздуха, $\text{м}^3/\text{сут}$ ; $Q_{\text{ср.сут}}$ - среднесуточный расход сточных вод, $\text{м}^3/\text{сут}$ .
Расход воздуха на 1 кг снятой органики, $\text{м}^3/\text{кг}$	$D_{\text{БПК}_5} = \frac{D_{1\text{м}^3}}{L_{\text{пост}} - L_{\text{очищ}}}$	$L_{\text{пост}}$ - содержание БПК в загрязненных сточных водах, $\text{мг}/\text{дм}^3$ или $\text{кг}/\text{м}^3$ ; $L_{\text{очищ}}$ - содержание БПК в очищенных водах, $\text{мг}/\text{дм}^3$ или $\text{кг}/\text{м}^3$ ; $D_{1\text{м}^3}$ - расход воздуха на очистку единичного объема сточных вод, $\text{м}^3/\text{м}^3$ .
Интенсивность аэрации $J$ , $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$	$J = \frac{D_{1\text{м}^3} \cdot H}{T}$	$H$ - глубина аэротенков, м; $T$ - период аэрации, ч.
Ежесуточный прирост ила $\text{Пр}$ , $\text{мг}/\text{дм}^3$	$\text{Пр} = Q \cdot 0,8 \cdot V_{\text{осв}} + 0,3 \cdot L_{\text{осв}}$	$Q$ — среднесуточный объем очищаемых сточных вод, $\text{м}^3/\text{сут}$ ; $V_{\text{осв}}$ — содержание взвешенных веществ в осветленной воде после первичных отстойников, $\text{мг}/\text{дм}^3$ ; $L_{\text{осв}}$ — БПК <sub>полн</sub> в осветленных водах после первичных отстойников во взболтанной пробе, $\text{мг}/\text{дм}^3$ .
Окислительная мощность - показатель $Y$ , г/г,	$Y = \frac{N}{1 + k_d \cdot V}$	$N$ — нагрузки по БПК <sub>5</sub> на ил, $\text{кг}/\text{кг}$ ; $V$ — возраст ила, сут; $k_d$ — константа скорости эндогенного окисления.
Степень рециркуляции $R$	$R = \frac{a_{\text{ср}}}{\frac{1000}{I} - a_{\text{ср}}} \cdot 100\%$	$R$ — рециркуляционное отношение возвратного ила к расходу очищаемых сточных вод; $a_{\text{ср}}$ — средняя доза ила, $\text{г}/\text{дм}^3$ ; $I$ — иловый индекс, $\text{см}^3/\text{г}$ .
Возраст ила, сут	$\text{Возраст ила} = \frac{a_{\text{ср}} \cdot T}{\text{Пр} \cdot 24}$	$T$ — период аэрации, ч; $\text{Пр}$ — прирост ила, $\text{мг}/\text{дм}^3$ .

Продолжение таблицы 2

1	2	3
Удельная нагрузка на 1 г беззольного вещества активного ила по БПК <sub>5</sub> ( $N_L$ , г/г в сут)	$N_L = \frac{L_{осв} \cdot Q_{ср} \cdot 100}{a_{ср} \cdot X \cdot W}$	$L_{осв}$ — БПК <sub>5</sub> во взболтанной пробе осветленной воды, мг/дм <sup>3</sup> ; $Q_{ср}$ — среднесуточный приток сточных вод, м <sup>3</sup> /сут; $W$ — общий объем всех работающих аэротенков и регенераторов, м <sup>3</sup> ; $X$ — беззольное вещество; $a_{ср}$ — средняя доза активного ила, г/дм <sup>3</sup> .
Удельная нагрузка по органическим загрязняющим веществам на 1 м <sup>3</sup> аэротенка с учетом периода аэрации $N_{WT}$ , г/м <sup>3</sup> в сут	$N_{WT} = \frac{L_{осв} \cdot Q_{ср} \cdot 24}{W \cdot T}$	$T$ — период аэрации, ч.
Окислительная мощность $G$ , кг/(м <sup>3</sup> • сут)	$G = 24 \cdot a_{ср} \cdot X \cdot \rho$	$X$ — доля беззольного вещества ила; 24 — постоянный коэффициент, служащий для перевода $G$ из размерности кг/(м <sup>3</sup> ч) в кг/(м <sup>3</sup> -сут); $\rho$ — удельная скорость окисления, г/(гч)

Оптимальный возраст ила составляет 7-10 суток, за счет чего достигается наибольшая эффективность очистки по всем обобщенным показателям загрязнения сточных вод (прозрачность, ХПК, БПК<sub>полн</sub>). Однако процессы нитрификации и трансформации сложноокисляемых соединений (фенолы, анилин) протекают несколько эффективнее при поддержании возраста ила 15-20 суток [20].

Нагрузка на ил находится в прямой зависимости от периода аэрации: чем больше период аэрации, тем меньше становится нагрузка. Способов расчета удельной нагрузки больше, они отличаются друг от друга сменяющимися переменными: содержанием взвешенных веществ (для нахождения нагрузки по взвешенным веществам), содержанием органических загрязняющих веществ (для нахождения нагрузки по органическим веществам), с учетом аэрации или без неё.

В целом процесс биохимического окисления загрязненных стоков можно иллюстрировать следующей блок-схемой (рисунок 2).

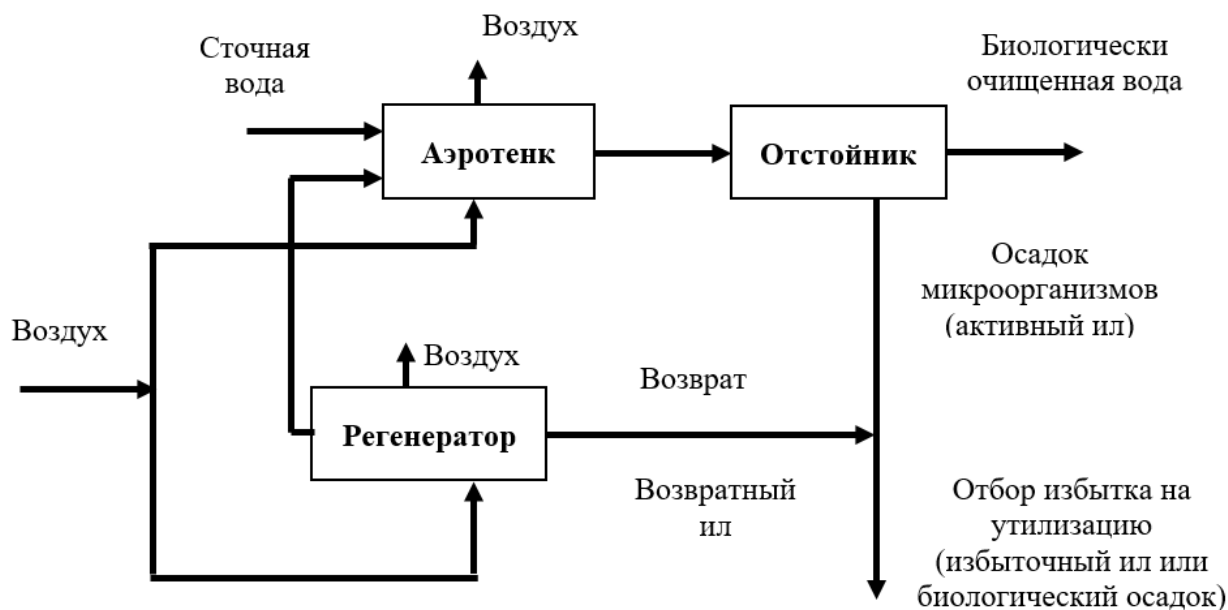


Рисунок 2 - Схема биологической очистки сточных вод

Изображенная на рисунке 2 блок-схема состоит из тесно взаимодействующих между собой составляющих:

- загрязненной сточной воды, поступающей на очистку; резервуара, в котором непосредственно осуществляется процесс поглощения микроорганизмами загрязняющих веществ, - аэротенка;
- микроорганизмов разных трофических уровней и видов, каждый из которых осуществляет свою функцию;
- установки для отделения массы отработанного активного ила от очищенной жидкости – отстойника;
- регенератора – сооружения, где активный ил восстанавливает свои окислительные свойства перед подачей вновь в аэротенк.

Понимание функций и связей этих отдельных субъектов, существующих как единая система, ведет к достижению высокого качества очистки стоков и обеспечению устойчиво функционирующего процесса [20].

### 1.1.1 Аэротенк

Аэротенк представляет собой биореактор, где происходит удаление органических загрязнений микроорганизмами в соответствии со следующей схемой, изображенной на рисунке 3:

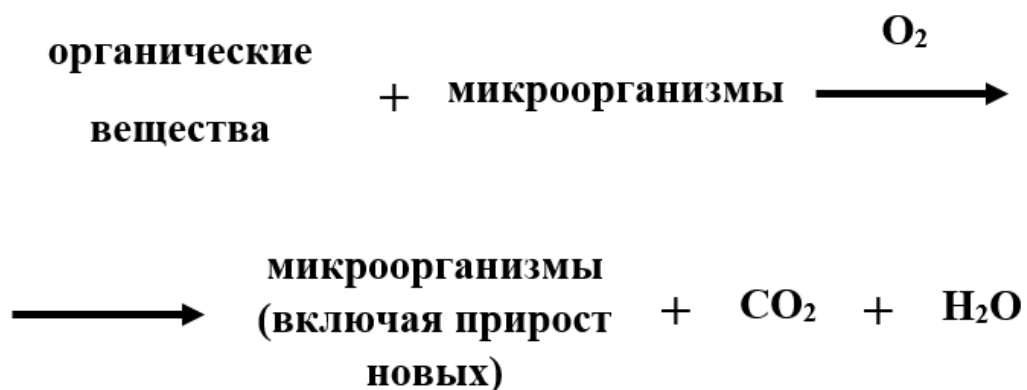


Рисунок 3 – Схема взаимодействия составляющих биологической очистки

Процесс окисления происходит с образованием углекислого газа и воды.

Микроорганизмы активного ила используют кислород для дыхания и получения энергии на синтез новых клеток. Для обеспечения дыхания населяющие биомассу бактерии могут использовать растворенный кислород.

Для дыхания микроорганизмы используют только растворенный в воде кислород. Доктор технических наук Е.Д. Гельфанд в учебном пособии «Основы биологической очистки сточных вод» выделяет некоторые параметры биологической очистки: «важнейшей технической характеристикой аэротенка является то, какое количество кислорода в растворенном состоянии вводится в единицу объема аэротенка в единицу времени в результате непрерывной аэрации среды, протекающей через аэротенк. В общей биотехнологии этот параметр принято называть коэффициентом сорбции кислорода и выражать его в  $\text{кгO}_2/\text{м}^3 \cdot \text{час}$ » [11, с. 5].

Работу аэротенка Е.Д. Гельфанд описал также с помощью следующих параметров в учебном пособии «Основы биологической очистки сточных вод» [11].

Параметр интенсивности аэрации отражает количество воздуха, подаваемого в единицу времени в удельный объем сооружения. От значений этого показателя напрямую зависит потребление электроэнергии в процессе очистки, т.к. воздух подается в аэротенк с помощью мощных компрессоров. Оптимальной и наиболее часто применяемой при эксплуатации очистных сооружений интенсивность аэрации варьируется в пределах от 0,8 до 8-10 м<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>·ч) [11].

- Время аэрации должно быть достаточным для максимально полного изъятия из воды содержащихся в ней загрязнений.

- Рабочая концентрация активного ила. Концентрация микроорганизмов должна быть пропорциональна содержанию органических растворенных загрязнителей в поступающих стоках. Если этот параметр не соответствует оптимальным значениям, в аэротенках наблюдается снижение качества очистки, а в отстойниках – ухудшение отделения отработанного избыточного активного ила от очищенной воды [20].

### 1.1.2 Вторичный отстойник

Заключительная стадия на этапе биологической очистки, где очищенная в аэротенке вода отделяется от избыточного активного ила под действием гравитационных сил, является важной частью системы.

В отстойнике помимо активного ила происходит отделение взвешенных веществ, содержание которых подлежит нормированию при выпуске очищенного стока в природный водоем. Аэрирование иловой смеси в процессе отстаивания не осуществляется, следовательно, в течение некоторого непродолжительного времени осевшая биомасса находится в анаэробных условиях. В течение этого промежутка времени ил не должен потерять физиологическую активность. Сохранение свойств ила необходимо, так как значительная его часть вернется в аэротенк в составе рециркуляционного потока.



Остаточной концентрации растворенного кислорода не хватает на дыхание. В этих условиях облигатные анаэробы, которые нуждаются в кислороде для осуществления процессов метаболизма, впадают в анабиоз. Микроаэрофилам нужно малое количество растворенного кислорода, поэтому их жизнедеятельность продолжается, они окисляют органические вещества, поглощенные ими же в аэротенке. Факультативно-анаэробные представители фауны аэротенков могут существовать и в аэробных и в анаэробных условиях, выделяют помимо конечных продуктов  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  другие водорастворимые и газообразные соединения. На фоне этих процессов могут самопроизвольно начаться явления распада микробных клеток [20].

Иловая смесь не должна находиться в отстойнике больше 2 часов ввиду развития анаэробных процессов и процессов самораспада. Для дальнейшей утилизации отбирают около 1% отработанного осадка, остальная масса возвращается в аэротенк.

Концентрация взвешенных веществ в очищенной биологическим методом сточной воде варьируется от 10 до 40 мг/дм<sup>3</sup>. В это величину входит и значение выноса избыточного активного ила из отстойника. В аэротенке концентрация активного ила несравненно выше – 2000-3500 мг/дм<sup>3</sup>. Доля выноса ила из вторичных отстойников составляет от 10 до 30% от его прироста [20].

### 1.1.3 Регенератор

В качестве самостоятельного сооружения регенератор не используют, а выделяют для регенерации избыточного ила один из коридоров аэротенка. Для восстановления функциональных характеристик ила необходимо поддержание высокой интенсивности аэрации. Она должна быть в 2 раза выше, чем в аэротенке.

Е.Д. Гельфандом отмечено следующее: «В процессе прохождения через регенератор восстанавливается аэробное дыхание микроорганизмов и

активизируется метаболизм продуктов, образующихся в отстойнике в результате анаэробного дыхания и самораспада части микроорганизмов; одновременно в метаболизм включаются собственные резервные вещества микробных клеток и сорбированные ими загрязнения; в итоге активный ил поступает в рабочую зону аэротенка в активном физиологическом состоянии» [11].

Осваивание метода биологической очистки стоков началось в конце XIX века; основоположниками данного метода стали англичане, когда промышленное развитие этой страны достигло своего расцвета, а почвенные методы, применяемые в то время, не могли обеспечить очистку такого большого объема образующихся сточных вод.

В настоящее время этот метод считается наиболее оптимальным для достижения высокого качества очистки вод, загрязненных самыми разными загрязняющими веществами и поступающими с самых разных промышленных производств, а также жилого сектора городов с разной плотностью населения. Без биологических сооружений не обходится ни одна станция очистки.

Метод имеет множество достоинств, среди которых высокое качество очистки, малые энергетические затраты, практически безотходное производство, наиболее природоподобная технология и т.д. Однако за такой долгий период эксплуатации подобных сооружений, человечество так и не научилось управлять этим процессом.

Появление неблагоприятных процессов, выводящих из равновесия биологическую систему аэротенка – нередкое явление в период эксплуатации биологических очистных сооружений. Дисбаланс в системе необратимо влечет за собой ухудшение качества очищенных стоков, которые в свою очередь загрязняют компоненты природной среды.

#### 1.1.4 Особенности состава сточных вод

В зависимости от происхождения сточная вода представляет собой раствор органических веществ определенного состава и концентрации. Показатели БПК<sub>5</sub>, БПК<sub>20</sub>, БПК<sub>полн</sub>, ХПК применяют для характеристики загрязненности стоков.

В учебном пособии «Основы биологической очистки сточных вод» также определены главные характеристики загрязненного стока. Е.Д. Гельфанд отмечает, что параметр БПК<sub>5</sub> показывает такое количество растворенного в воде кислорода, которое необходимо микроорганизмам активного ила для дыхания, расщеплении присутствующих в воде органических соединений до конечных продуктов и осуществления прироста биомассы за период времени 5 суток.

Еще два параметра - БПК<sub>20</sub> и БПК<sub>полн</sub> – имеют схожее действие с описанным параметром БПК<sub>5</sub>. Различия заключаются во временном интервале продолжительности протекания процесса: величина БПК<sub>20</sub> фиксируется при 20-суточной инкубации, БПК<sub>полн</sub> – в случае полного удаления органических и других окисляемых соединений.

Величина параметра химического потребления кислорода (ХПК) указывает на наличие в воде веществ, окисление которых возможно только химическим путем [11].

«По степени возрастания численных значений показатели загрязненности воды располагаются в следующей последовательности: БПК<sub>5</sub> < БПК<sub>20</sub> < БПК<sub>полн</sub> < ХПК» [11, с. 3]. Эти соотношения характеризуют специфичность воды в зависимости от её происхождения. Также они определяют пригодности биологического метода для очистки этой воды. Если показатель БПК<sub>5</sub> максимально схож с ХПК, можно сделать вывод о наиболее оптимальном методе очистки стоков, имеющих такие параметры, - биологический. Следовательно, чем больше разница между значениями этих показателей, тем менее эффективным является использование биологического метода. Если значения БПК<sub>полн</sub> и ХПК сильно отличаются

друг от друга, значит в стоке присутствуют органические соединения, которые не поддаются окисления со стороны биомассы.

Применять в качестве основного метода очистки биологический нецелесообразно при очистки сточных вод с показателем БПК<sub>полн</sub> менее 70% от ХПК.

Для эффективного удаления из сточной воды загрязнений и усвоения их микроорганизмами, в составе стоков должны содержаться биогенные элементы, такие как калий, азот и фосфор.

Показатель БПК<sub>полн</sub> обычно составляет от 100 до 200 (и более) мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. Значение этого параметра и расход сточной воды прописаны в паспортных характеристиках аэротенка, поэтому должны строго соблюдаться. Наряду с параметрами биологического и химического потребления кислорода значимым параметром очистки является содержание взвешенных веществ [3].

Для поддержания высокой эффективности биологической очистки необходимо поддерживать на оптимальном уровне концентрацию растворенного кислорода, температуру и кислотность среды; показатель pH должен быть близким к 7 (пределы варьирования 6,8-8,2).

## **1.2 Требования к качеству очистки**

Критерии качества очистки стоков определяются состоянием естественных водных бассейнов – рек, озер и прочих водоемов. На их самоочищение можно надеяться лишь в случае незначительного загрязнения легкоразлагаемой органикой, которая не содержит агрессивных веществ и попадает в водоемы в небольших единовременных концентрациях.

Для адекватной оценки самоочищающей способности необходимо знать несколько значимых характеристик:

- разбавление сточных вод;
- кислородный режим водоема;
- санитарно-гигиенические показатели стоков.

В настоящее время проблемы самоочистки водоемов значительно обострились. Этому способствуют:

- увеличивающиеся масштабы загрязнения водной среды;
- постоянно растущее количество источников выпуска;
- увеличение количества и видов загрязнителей и другие.

Понятие самоочистки не включает в себя простое снижение концентрации загрязняющих веществ, которое происходит в результате разбавления. Процесс самоочистки подразумевает разложение токсичных соединений сложного состава до простых веществ, которые участвуют в естественном круговороте веществ в природе и не имеют на нее токсичного влияния.

Эффективной может быть признана такая степень самоочистки, при которой химико-биологические показатели водоема будут соответствовать показателям водной среды до ее загрязнения.

В то время, когда промышленный прогресс еще был не так выражен, использованную воду перед сбросом в водоем достаточно было очистить от взвешенных веществ отстаиванием и обеззаразить. Когда в результате повышения темпов развития промышленности возросла и антропогенная нагрузка на все компоненты природной среды, в частности, на водные объекты, требования к сбросу загрязняющих веществ существенно ужесточились. На данный момент содержание в стоках, подлежащих сбросу в природный водоем, ограничивают по более чем 1300 наименований загрязнений. Также строго регламентировано содержание в стоках биогенных элементов (фосфор и азот). Требования к параметрам очищенной сточной воды, а также к её количественному и качественному составу определены в следующих документах:

- Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 N 7-ФЗ;

- Федеральный закон «О водоснабжении и водоотведении» от 07.12.2011 N 416-ФЗ;

- «Водный кодекс Российской Федерации» от 03.06.2006 N 74-ФЗ (ред. от 29.07.2017);

- СанПиН 2.1.5.980-00 «Гигиенические требования к охране поверхностных вод»;

- Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 N 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

Цель создания перечисленных нормативно правовых актов заключается в регулировании и ограничении количества загрязнений, попадающих в водные объекты из окружающей среды, а также формирование значений предельных концентраций различного рода химических веществ.

«Санитарные нормы и правила» созданы для ограничения хозяйственной деятельности, которая может нанести вред компонентам природной среды в виде загрязнения её отходами производства.

Все водные объекты рыбохозяйственного значения делятся на три категории: высшую, первую и вторую. Параметры и назначение объектов всех трех категорий утверждены приказом Росрыболовства в зависимости от назначения водоема: используются для добычи особо ценных и ценных видов водных биоресурсов, используются или могут использоваться для добычи (вылова) водных биоресурсов, не относящихся к особо ценным и ценным видам.

Требования к качеству вод водных объектов разных категорий несколько разнятся. Лимитирующие показатели вредности же устанавливаются для конкретного вещества, вне зависимости, в какой водоем будет произведен сброс. Лимитирующий показатель вредности (ЛПВ) — это признак, характеризующийся минимальным безопасным содержанием вещества в жидкости. Различают органолептические, санитарно-токсикологические или общесанитарные показатели, значение ПДК устанавливается по наименьшему из них по конкретному веществу.

Значения предельных концентраций загрязняющих веществ их ЛПВ содержатся в приказе Минсельхоза России от 13.12.2016 N 552, часть из них представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Показатели качества очищенных сточных вод для водоемов рыбохозяйственного назначения [7]

№ п/п	Наименование показателя	Норматив ПДК очищенной сточной воды, поступающей в водоем рыбохозяйственного назначения
1	2	3
1.	Водородный показатель	-
2.	Железо	0,1 мг/дм <sup>3</sup>
3.	Кальций	160 мг/ дм <sup>3</sup>
4.	Магний	40 мг/ дм <sup>3</sup>
5.	Сульфаты	100 мг/ дм <sup>3</sup>
6.	Хлориды	300 мг/ дм <sup>3</sup>
7.	Щелочность	pH 7-9
8.	Нитраты	40 мг/дм <sup>3</sup>
9.	Нитриты	0,08 мг/дм <sup>3</sup>
10.	СПАВ	0,5 мг/ дм <sup>3</sup>
11.	Нефтепродукты	0,05 мг/ дм <sup>3</sup>
12.	Аммоний (по азоту)	0,4 мг/ дм <sup>3</sup>
13.	Аммоний-ион	0,5 мг/ дм <sup>3</sup>
14.	БПК полн.	-
15.	Фосфат-ион	0,2 мг/ дм <sup>3</sup>
16.	Фосфаты по(Р)	1-2 мг/ дм <sup>3</sup>
17.	Взвешенные вещества	10 мг/ дм <sup>3</sup>
18.	Медь	0,001 мг/ дм <sup>3</sup>
19.	Ртуть	отсутствие
20.	Свинец	0,006 мг/ дм <sup>3</sup>
21.	Фенол	0,001 мг/ дм <sup>3</sup>
22.	Фториды	0,75 мг/ дм <sup>3</sup>
23.	Хром	0,07 мг/ дм <sup>3</sup>

### **1.3 Особенности биологической очистки стоков городских сточных вод на примере очистных сооружений г.о. Жигулевск**

На городские очистные сооружения попадают сточные воды различного происхождения. Промышленные и бытовые сточные воды занимают более половины от общего объема всех стоков. Это стоки различных технологических процессов и санитарных зон, возникающие в результате функционирования промышленных предприятий и домохозяйств. Производственные стоки попадают в очистные сооружения после прохождения всевозможных технологических цепочек и циклов. В зависимости от вида производства они могут быть загрязнены как минеральными, так и органическими или биологическими загрязнениями. Бытовые стоки отличаются преобладанием органических соединений. В случае необходимости такие воды проходят локальную очистку непосредственно на предприятии, где они были образованы.

Сточные воды г.о. Жигулевска производственного и хозяйственно-бытового происхождения попадают на сооружения полной биологической очистки с помощью насосных станций и сетей канализации. «Проектная производительность канализационных очистных сооружений составляет 16200,00 м<sup>3</sup>/сут, 5913,000 тыс. м<sup>3</sup>/год» [23].

В технологическую схему очистки сооружений входят установки для осуществления механической очистки: приемная камера; решетки-дробилки; песколовки с круговым движением воды; первичные вертикальные отстойники; система биологической очистки: аэротенки-смесители; аэробный минерализатор; вторичные вертикальные отстойники; контактный резервуар; блок обеззараживания представляет собой хлораторную. Для обработки образующихся на всех стадиях очистки отходов используются илоуплотнители; иловые площадки; песковые площадки.

Состав городских стоков очень разнообразен и зависит в первую очередь от специфики отдельно взятого города: плотности населения и качества жизни, наличия производственных объектов и их направленности,



степени негативного воздействия на окружающую среду, развитием автопарка и т.д. В таблице 4 представлены основные загрязняющие вещества, поступающие со стоками различного происхождения на очистные сооружения г.о. Жигулевск.

Таблица 4 – Загрязняющие вещества, характерные для различных видов промышленных предприятий, отводящих сточные воды на городские очистные сооружения г.о. Жигулевск

Происхождение сточных вод		Наиболее характерные загрязняющие вещества в стоках	Усредненные концентрации, мг/ дм <sup>3</sup>
Хозяйственно-бытовые (МКУ «ТОЭЗ», ООО «Миндаль», ООО «СКК», ООО «Коралл»)		БПК <sub>полн</sub>	166,32
		Взвешенные вещества	662,45
		ПАВ анионоактивный	0,812
		Азот аммонийный	29,4
Производственные	Промышленные предприятия, химическая промышленность (ЗАО «АКОМ», ООО НПФ «МЕТА», ЗАО «ЖКУ», ООО «ПЗСК», ПАО «РусГидро»)	рН	8,83
		Сульфаты	408,114
		Фосфаты по фосфору	0,948
		Нефтепродукты	2,17
		Взвешенные вещества	81,64
		ПАВ анионоактивный	6,15
		Медь	0,0011
		Свинец	0,054
		Никель	0,143
		Хром	0,234
	Автомойки, автотранспортные хозяйства (ООО «ЖАТХ», МРСК Волги, ООО «Корона», ООО «ВВС», ООО «СУМР-17», ООО «Созвездие»)	ПАВ анионоактивный	2,71
		Нефтепродукты	3,781
		Взвешенные вещества	5836
	Фармацевтическое производство (ООО «ОЗОН»)	Взвешенные вещества	720
		Сульфаты	54,3
		Фосфаты по фосфору	4,7
	Металлургическое производство (АО «Волжская металлургическая компания»)	Нефтепродукты	10,8
		Железо общее	0,05
		рН	8,97

Попадая на очистные сооружения стоки смешиваются, усредняются по составу и температурным значениям.

При эксплуатации биологических очистных сооружений необходимо учитывать следующее:

- гидробиологический состав биомассы активного ила, который осуществляет непосредственное окисление загрязняющих веществ в аэротенке;
- свойства биоценоза;
- процесс окисления загрязнений;
- условия и параметры протекания процесса;
- факторы, влияющие на протекание процесса.

### 1.3.1 Гидробиологический состав биомассы активного ила

Обитающие в очистных сооружениях организмы можно условно разделить на следующие группы: бактерии, грибы, простейшие, водоросли, многоклеточные [26].

В разных типах сооружений биоочистки обитают разные микроорганизмы. Происходит это из-за различий в условиях для жизнедеятельности. Например, в биофильтрах обнаружено наибольшее видовое разнообразие, которое обусловлено сильно изменяющимися условиями (из-за различий в конструкциях установок. Более подробно остановимся на составе биоценозов, обитающих в установках с активным илом – аэротенках.

Организмы, населяющие такой биоценоз относятся к разным трофическим уровням (в данном случае их три), у микроорганизмов каждого уровня свои особенности, функции и конкуренты. Представители нижнего уровня являются пищей для более сложных микроорганизмов. Схема представлена на рисунке 4.

На первом трофическом уровне находятся бактерии-гетеротрофы, которые составляют 90-95% от населения всего биоценоза. Их основной задачей является разложение взвешенной органики с помощью механизма внеклеточной ферментации. Популяции этих бактерий имеют большую

общую поверхность за счет микронных размеров, благодаря чему они активно перерабатывают содержащиеся в сточных водах питательные вещества. Бактерии подразделяют в зависимости от окисляемого ими субстрата: органический углерод, серу, фосфор, а также от выполняемых функций: образование флокул, осуществление процесса нитрификации, образование нитевидной структуры [31]. Основные представители бактерий представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Представители первого трофического уровня

Наименование рода бактерий	Функции
1	2
Pseudomonas	Окисление спиртов, жирных кислот, парафинов, ароматических углеводородов, углеводов и многих других органических соединений
Bacterium	
Micrococcus	
Sacrina	
Bacillus	
Pseudobacterium	
Azotobacter	
Brevibacterium	Способны разлагать парафины, нафтены, фенолы, альдегиды, жирные кислоты и другие органические соединения, входящие в состав нефти
Mycobacterium	Окисляют углеводороды, принадлежащие к различным группам
Bacillus	Окисляют алифатические углеводороды
Cellulomonas	Способны разлагать целлюлозу
Zooglea ramigera	Образование флокул активного ила
Desulfotomaculum и Desulfovibrio	Литотрофные бактерии: железобактерии и серобактерии, использующие в качестве питательных субстратов неорганические вещества
Pseudomonas, Aeromonas, Acinetobacter, Micrococcus, Paracoccus	Активно выделяющим полисахариды, необходимые для образования биополимерного полисахаридного геля
Nitrosomonas и Nitrobacter	Бактерии-нитрификаторы, окисляют и удаляют из сточной воды аммонийный азот

На рисунке 4 отражено взаимодействие микроорганизмов разных трофических уровней.

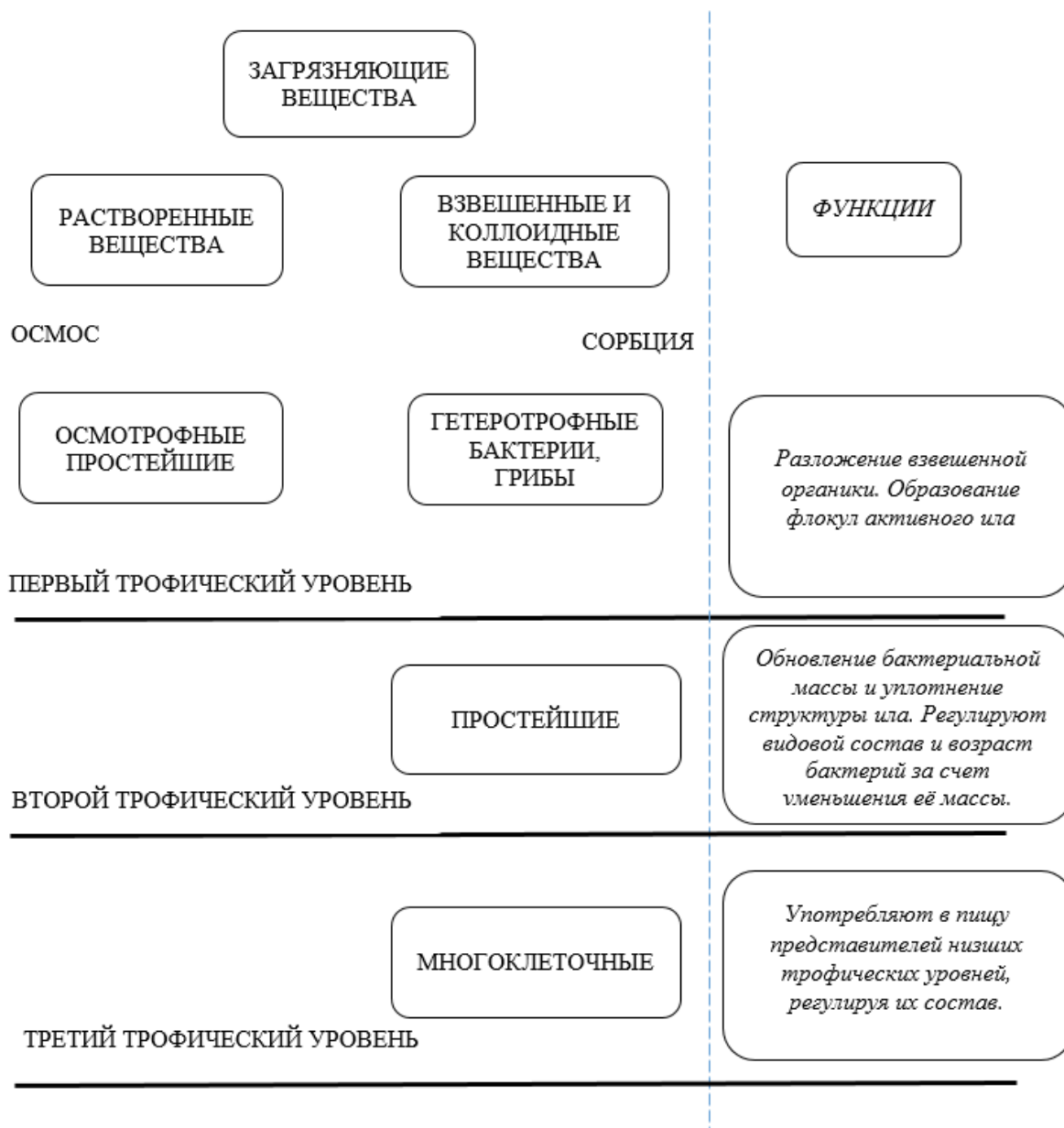


Рисунок 4 – Взаимодействие микроорганизмов разных трофических уровней

Перечисленные представители в биоценозе существуют в виде скоплений, которые еще называют хлопком активного ила. Они очень чувствительны к токсическому воздействию, склонны к разрушению под действием содержащихся в стоках отравляющих веществ. В связи с этим, у флокулообразующих бактерий существуют множество конкурентов за питательные вещества. Конкурирующие виды наиболее приспособлены к изменяющимся условиям и веществам, имеющим токсическое воздействие. При нарушениях технологического процесса очистки флокулообразующие бактерии могут начать массово гибнуть под действием неблагоприятных для

их жизнедеятельности факторов, их место занимают более устойчивые нитчатые бактерии, которые начинают массово размножаться в освободившейся пищевой нише. При взаимодействии нитчатых микроорганизмов с флокулообразующими бактериями, первые внедряются в их структуру, вызывая дефлокуляцию, т.е. разрушение флокул, что неизбежно ведет к увеличению объема и неосаждаемости [16].

Основными представителями нитчатых бактерий являются хламидобактерии и цианобактерии. Они наиболее устойчивы к воздействию токсических веществ, в отличие от бактерий-гетеротрофов, которые под действием токсинов теряют способность к выработыванию биополимерного геля, теряют хлопьевидную форму, распадаются, вследствие чего открывается доступ токсинов в бактериальной массе, что вызывает её гибель.

Еще одним представителем низшего трофического уровня являются сапрофитные грибы, устойчивые к повышению кислой реакции водной среды. Так же, как и нитчатые бактерии, грибы-сапрофиты вызывают вздутие биомассы, ухудшают окисляющие свойства [17].

Актиномицеты также являются конкурентами основных представителей активного ила. При обильном размножении они выделяют биологические поверхностно-активные вещества, что приводит к образованию обильной пены, мешающей нормальному течению процесса очистки.

На втором трофическом уровне располагаются простейшие микроорганизмы, пищей для которых служат бактерии первого уровня, а также органический субстрат. Их функция заключается в обновлении бактериальной биомассы и уплотнении структуры ила. Они регулируют видовой состав и возраст бактерий за счет уменьшения её массы. Простейшие представлены амебами, саркодовыми, жгутиковыми и реснитчатыми инфузориями (подробнее в таблице 6).

Таблица 6 - Население второго трофического уровня

Наименование группы микроорганизмов	Наименование рода
1	2
Саркодовые, или Sarcodina	Амебы <i>Amoeba limax</i> , <i>Amoeba dipilodea</i> , <i>Amoeba proteus</i>
	Раковинные корненожки <i>Arcella</i> , <i>Centropyxis</i> , <i>Pamphagus</i>
	Голые корненожки <i>Pelomyxa</i>
Жгутиковые инфузории <i>Mastigophora</i> , <i>Flagellata</i>	Бесцветные жгутиконосцы <i>Oicomonas</i> , <i>Bodo</i> , <i>Peranema</i>
Реснитчатые инфузории <i>Ciliata</i>	Свободноплавающие <i>Colpidium</i> , <i>Stylonychia</i> , <i>Oxytricha</i> , <i>Stylonychia</i> , <i>Euoplotes</i> , <i>Aspidsca</i>
	Одиночные прикрепленные сувойки <i>Vorticella</i>
	Колониальные прикрепленные <i>Opercularia</i> , <i>Carchesium</i> , <i>Epistylis</i>
Сосущие инфузории <i>Suctorina</i>	Представители родов <i>Podophrya</i> , <i>Tokophrya</i> , <i>Acineta</i>

Представители этого уровня наиболее чувствительны к изменениям условий, за счет чего их состав наглядно характеризует работу системы. Например, появление микроамеб разных видов свидетельствует об измельчении хлопьев активного ила, недостаточной аэрации и высокой нагрузки [20].

Третий трофический уровень занимают многоклеточные микроорганизмы (низшие беспозвоночные, насекомые, ракообразные). В основном они употребляют в пищу представителей низших трофических уровней: бактерий и простейших. В таблице 7 перечислены представители третьего трофического уровня.

Таблица 7 - Представители третьего трофического уровня

Наименование группы/класса микроорганизмов	Наименование рода
1	2
Коловратки	<i>Rotatoria</i> , <i>Philodina</i> , <i>Cathypna</i> , <i>Monostyla</i> , <i>Notommata</i>
Круглые черви	<i>Nematoda</i>
Малощетинковые черви	<i>Aelosoma</i>

По интенсификации роста этих микроорганизмов можно также судить о работе системы очистки: высокая популяция коловраток является

показателем хорошей работы сооружений, раздутость погибших коловраток указывает на недостаточную аэрацию стоков; круглые черви развиваются только при наличии в аэротенке застойных зон, а щетинковые черви свидетельствуют о удовлетворительном протекании процесса нитрификации.

В зависимости от способности к биохимическому окислению загрязнений активный ил подразделяется на три типа: низкий средний и высокий. Первый тип характеризуется низким деструкционным потенциалом, он, как правило, формируется под действием высоких нагрузок и не отличается высоким видовым разнообразием (13-35 видов бактерий и микроорганизмов). Это самый неустойчивый к внешнему воздействию тип [31].

Самым приспособленным к периодическим изменениям среды является третий тип, который характеризуется высоким деструкционным потенциалом, отличается высоким видовым разнообразием (до 45 видов микроорганизмов). Именно благодаря видовому разнообразию биоценоз ила может претерпевать негативное влияние многих факторов, конкурентов флокулообразующих бактерий в нем содержится минимальное количество, хлопья имеют крупные размеры и плотную структуру. Такая система является наиболее стабильной, может обеспечивать высокие показатели очистки стоков. Исключением может быть только наличие в стоках сильных токсинов или же нарушение баланса питательных веществ.

### 1.3.2 Свойства биоценоза

Важнейшее свойство активного ила, без которого невозможно обеспечение высоких показателей очистки, - способность образовывать хорошо оседающие хлопья. Эффективность очистки в значительной степени зависит от последующего процесса разделения избыточного ила и очищенного стока.

Значение илового индекса отражает характеристику осаждаемости активного ила. Величина этого показателя, не превышающая  $100 \text{ см}^3/\text{г}$

считается оптимальной. При увеличении этого значения работа вторичных отстойников и очистных сооружений в целом значительно ухудшается. Большое значение илового индекса показывает, что ил становится лёгким, занимает большой объем, плохо оседает, нарушая работу вторичных отстойников.

Процесс осаждения и уплотнения активного ила за промежуток времени 30 минут, характеризующегося оптимальным значением илового индекса, обеспечивающего высокую степень очистки, отражен на рисунке 5.

Оптимальные значения илового индекса в системе очистки устанавливаются в определенном диапазоне в зависимости от конструктивных особенностей, а также технических возможностей выгрузки осевшего во вторичных отстойниках отработанного ила.

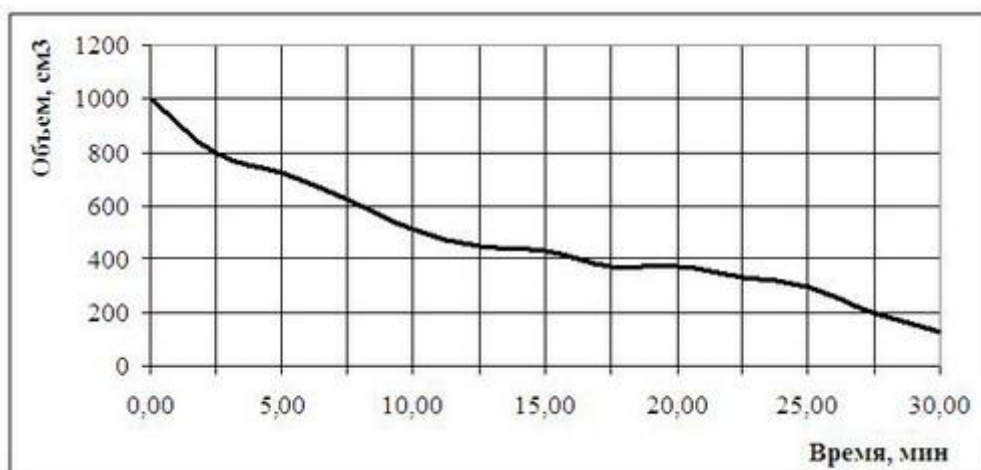


Рисунок 5 — Осаждение активного ила с седиментационными характеристиками, удовлетворяющими требованиям к уплотнению биомассы во вторичных отстойниках

Обычно для станций очистки стоков с аэротенками принимают диапазон оптимальных значений илового индекса от 80 до 120 см<sup>3</sup>/г, допустимые значения ограничены — от 60 до 150 см<sup>3</sup>/г.

Значение илового индекса хорошо характеризует состояние системы биологической очистки. Его стабильные показатели указывают на высокую жизнеспособность активного ила и правильный режим эксплуатации сооружений (оптимальный процент ила возвращается в систему после



регенерации, необходимое количество биомассы удаляется из системы на утилизацию) [42].

### 1.3.3 Процесс окисления загрязнений активным илом

Очистка сточных вод заключается в том, что загрязняющие вещества поглощаются и разлагаются различными микроорганизмами. Продукты распада используются ими для обеспечения собственной жизнедеятельности. Загрязняющие вещества подвергаются действию ферментов, в результате чего углеродсодержащие составляющие разлагаются до конечных продуктов – углекислого газа и воды.

Процесс биохимического окисления в соответствующих сооружениях проходит в два этапа. Первый заключается в адсорбции на поверхностной пленке зоогелей ила загрязнений. На втором этапе происходит окончательное окисление трудноокисляемых составов.

На рисунке 6 отображена технологическая схема осуществления процесса биологической очистки, взаимосвязь её составляющих.

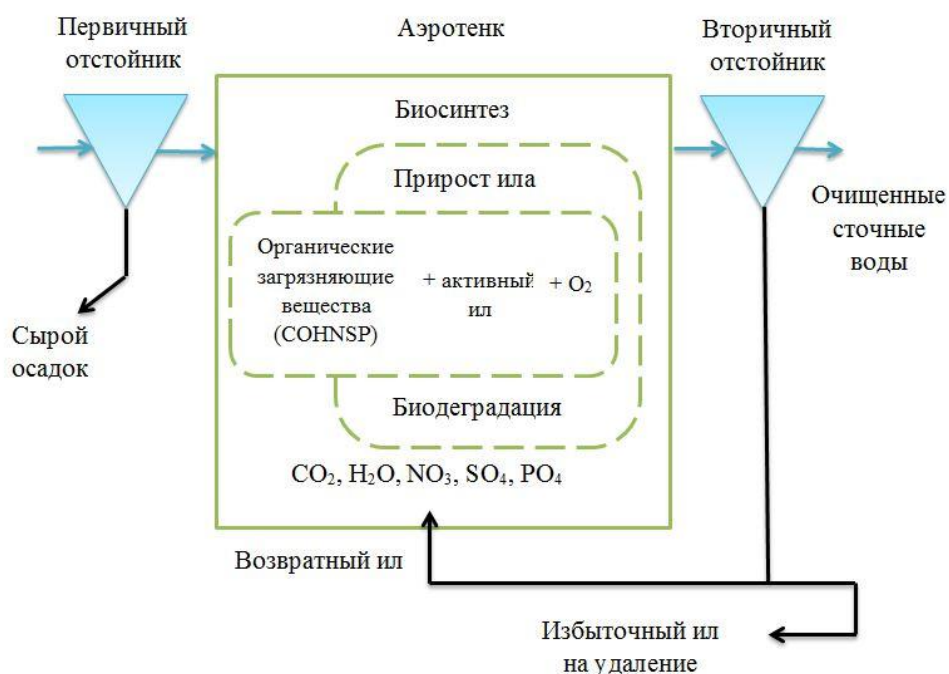


Рисунок 6 –принципиальная схема биологических очистных сооружений

Процесс окисления органической составляющей сточных вод и её потребление микроорганизмами происходит в три этапа [41]:

1. На первом этапе протекает массопередача загрязняющих веществ из стока к поверхности клетки. Параметрами этого этапа являются гидродинамические условия в аэротенке. От них напрямую зависит скорость протекания процесса. Также на скорость и качество процесса влияет режим перемешивания, оно должно обеспечиваться интенсивно и непрерывно. Процессы на этом этапе протекают гораздо быстрее последующих.

2. Вторым этапом осуществляется диффузия органического вещества через полупроницаемые мембраны клеток. Значительная часть веществ транспортируется внутрь клетки специфическим белком-переносчиком, который образует комплекс, диффундирующий через мембрану. Когда комплекс разрушается, белок возвращается к мембране клетки для осуществления нового цикла переноса.

3. Заключительным этапом происходит деструкция органических веществ, сопровождающаяся синтезированием новых клеток и выделением энергии. Окисление органических веществ протекает при участии определенных ферментов. Продуктами окисления помимо конечных продуктов – двуокиси углерода и воды – могут быть также сульфаты и нитраты.

Скорости изъятия загрязнений и их разложения являются ключевыми параметрами, определяющими технологическое оформление очистки стоков. В процессе окисления органических веществ в условиях аэрации биоценоз активного ила проходят фазы развития, показанные на рисунке 7 [37].

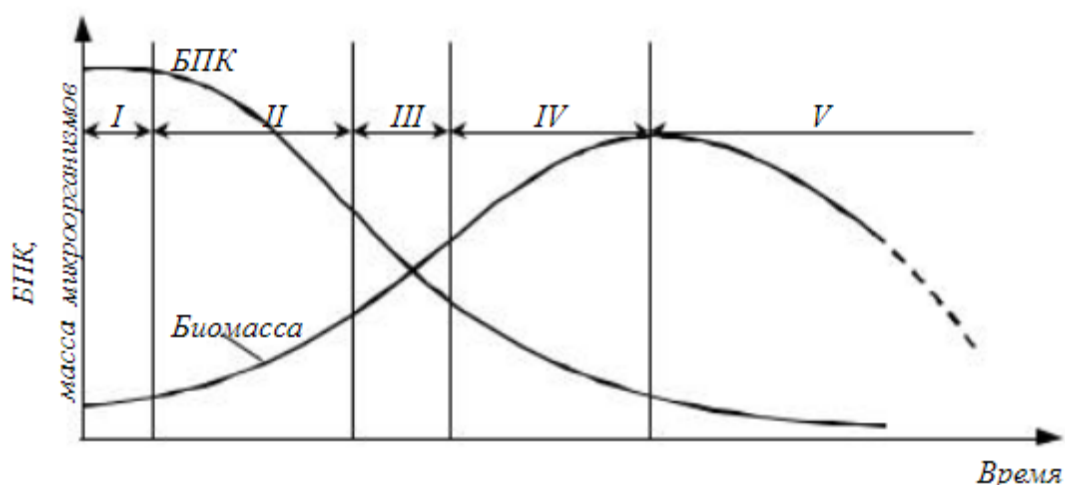


Рисунок 7 - Зависимость прироста микроорганизмов активного ила и удаления из системы органических растворенных веществ от продолжительности периода аэрирования иловой смеси

1. В лаг-фазу I происходит адаптация биоценоза к составу стоков. В этой фазе прироста ила практически не наблюдается.

2. В фазу экспоненциального (ускоренного) роста II скорость размножения клеток максимальна ввиду избытка питательных веществ и отсутствия продуктов обмена.

3. Фаза III, в процессе протекания которой начинает наблюдаться недостаток питания и накопление продуктов метаболизма, следовательно, снижается скорость роста микроорганизмов биоценоза, называется также фазой замедленного роста.

4. Изменения количества биомассы не происходит в фазе нулевого роста IV.

5. Фаза, в которой начинает проявляться недостаток питания, который ведет к отмиранию и распаду клеток, называется фазой эндогенного дыхания (самоокисления) V. Во время протекания фазы самоокисления происходит снижение количества биомассы.

В первых трех фазах ввиду бурного роста биомассы происходит «омолаживание» культуры, в ней преобладают новые клетки. В фазу нулевого роста рост и распад клеток находятся в равновесии. В

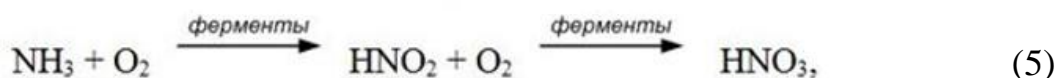
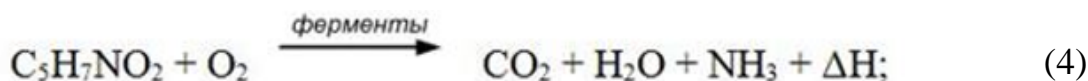
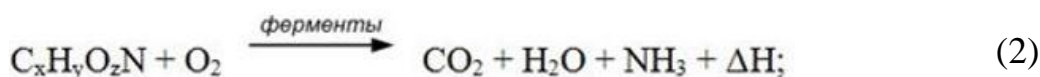
заключительной пятой фазе отмирание клеток преобладает, роста практически не происходит.

При осуществлении деструкции органической составляющей сточных вод важна определенная последовательность протекания реакции, а также присутствие определенных катализаторов этих реакций – ферментов. Клетки бактерий выделяют ферменты для ускорения биохимических реакций. Каждый фермент может ускорять только одно определенное превращение. Температура протекания реакции также оказывает влияние на поведение фермента во время превращения. Для окисления сложной смеси растворенных органических соединений необходимо около 100 ферментов, которые функционируют в определенных, подходящих только им условиях [9].

Активность ферментов можно повысить с помощью активаторов. Активаторами могут являться витамины, а также катионы  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ . Ингибиторы оказывают противоположное, тормозящее, действие на реакцию. Ингибиторами могут быть антибиотики или соли тяжелых металлов.

Биологическая деструкция представляет собой сложный многоступенчатый процесс, который начинается с выделения активного водорода в процессе расщепления органического вещества.

Протекающие в процессе биологической очистки реакции можно схематично изобразить следующим образом [9]:



где  $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z\text{N}$  –содержащиеся органические соединения в сточной жидкости;  $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$  - условная формула клеточного вещества бактерий;  $\Delta\text{H}$  - энергия.

Процесс окисления загрязняющего вещества для удовлетворения потребностей клетки в энергии описывает реакция (2), этот процесс называют катаболическим. Реакция синтеза клеточного вещества отражена в реакции (3), этот процесс называют анаболическим. На осуществление этих двух реакций требуется такое количество растворенного кислорода, которое соответствует БПК<sub>полн</sub> сточной воды. Последние две реакции описывают превращение клеточного вещества, когда наблюдается недостаток питательных веществ. Расход кислорода на осуществление катаболического и анаболического процессов клетки составляет около половины от расхода на все 4 реакции [9].

Такие соединения, как аммонийный азот, неорганический углерод подвергаются разложению автотрофными бактериями. Этот процесс носит название нитрификации. При наличии в стоках органики в биоценозе активного ила начинают развиваться гетеротрофные микроорганизмы, которые потребляют азот в процессе конструктивного обмена. Бактерии-нитрификаторы потребляют азот, неиспользованный гетеротрофами. Из этого следует, что присутствующая в стоках органика способна замедлять рост нитрифицирующих бактерий. Также им могут составлять конкуренцию гетеротрофы в борьбе за кислород, необходимый для жизнедеятельности обоих этих видов.

Первый этап процесса нитрификации осуществляют бактерии рода *Nitrosomonas*. Они окисляют аммонийный азот до нитритов, используя в качестве субстрата аммонийный азот, гуанин, мочевины. Органическая часть молекулы им не нужна. Окисление нитритов до нитратов происходит на втором этапе процесса, эти превращения осуществляют бактерии рода *Nitrobacter* [4].

Бактерии родов *Denitrificans*, *Fluorescens*, *Putrescens* используют связанный кислород нитритов и нитратов, образованных в процессе нитрификации, для окисления находящихся в стоках органических веществ. Этих бактерий называют денитрификаторами, а осуществляемый ими

процесс – денитрификацией. В процессе денитрификации нитриты и нитраты восстанавливаются до молекулярного азота.

Денитрифицирующим бактериям для обеспечения жизнедеятельности необходимо наличие органических веществ и отсутствие кислорода, т.к. эти бактерии относятся к анаэробным. Эти микроорганизмы удаляют легкоокисляемые вещества, для этого они используют кислород нитратов и нитритов. Высокомолекулярные полимерные соединения не могут быть использованы бактериями-денитрификаторами.

Чтобы обеспечивать стабильно высокую интенсивность процесса необходимо соблюсти ряд условий. Например, величина рН должна держаться в пределах от 7,0 до 8,2. При слишком низком (ниже 6,1) или слишком высоком (выше 9,6) параметре рН процесс останавливается. Также на протяжении процесса оказывает большое влияние температура, повышение которой интенсифицирует процесс.

Так как в аэротенке в составе биомассы ила одновременно могут быть зоны с недостатком растворенного кислорода и зоны с высоким его содержанием, процессы нитри- и денитрификации протекают одновременно. При необходимости в более глубоком проведении каждого из этих процессов, их разделяют.

#### 1.3.4 Факторы, определяющие удовлетворительную работу аэротенков

Для обеспечения и поддержания высокого качества очистки стоков биологическим методом необходимо поддерживать на оптимальном уровне следующие факторы: значение температуры иловой смеси; достаточное содержание питательных веществ, постоянное аэрирование иловой смеси, обеспечивающее высокое содержание растворенного кислорода; значение рН в допустимых пределах; присутствие токсинов. На работу аэротенков также оказывает влияние технологический режим эксплуатации, где определяющую роль играют:

- достаточная аэробность сооружения;

- достаточное время нахождения иловой смеси в сооружении;
- соответствие дозы ила концентрации загрязняющих веществ, поступающих со входящим стоком; если соотношение нарушается в сторону увеличения концентрации последних, увеличивается нагрузка на биоценоз активного ила, эффективность очистки снижается; в случаях увеличения концентрации ила свыше оптимальной нарушается работа вторичных отстойников ввиду недостаточного уровня разделения очищенного стока и биомассы ила.

Происходящие при протекании биологической очистки процессы можно представить в виде схемы. Не все органические загрязняющие вещества окисляются микроорганизмами до конечных продуктов – углекислого газа и воды, часть из них поступает на формирование запасных веществ и синтез новых клеток микроорганизмов биомассы. Биомасса ила растет в результате синтеза. Доза ила по массе показывает количество в иловой смеси микроорганизмов-деструкторов.

Для поддержания высокого уровня работы аэротенков и эффективности очистки необходимо своевременно увеличивать дозу биомассы активного ила в соответствии с ростом содержания концентрации загрязнителей в стоке. В таком случае удельная нагрузка на ил будет поддерживаться в оптимальных для работы значениях. Норма рабочей концентрации ила устанавливается исходя из технических возможностей отделения ила от очищенной воды, а также в зависимости от нагрузки на ил по показателю БПК.

Если в системе очистки присутствует регенератор, то средняя концентрация ила устанавливается при проектировании. Средним показателем значения дозы ила, при котором наблюдаются удовлетворительные показатели осаждения ила во вторичном отстойнике считается величина  $3 \text{ г/дм}^3$ . Превышение этого значения ведет к загниванию активного ила в зоне осаждения вследствие излишнего его накопления. Седиментационные характеристики ила ухудшаются, повышается его вынос

с очищенной водой. Концентрация растворенного кислорода снижается, качество очистки падает. Для того, чтобы обеспечить глубокое доокисление сложноокисляемых загрязнений, в регенераторах поддерживают дозу ила, превышающую в 2-3 раза дозу в аэротенках.

Кислородный режим играет большую роль в работе аэротенков. Концентрация растворенного кислорода, равная  $0,2 \text{ мг/дм}^3$ , является критической для микроаэрофилов, населяющих биоценоз ила. Удовлетворительным содержанием растворенного кислорода считается значение  $0,5 \text{ мг/дм}^3$ . Для того, чтобы ил сохранял свою жизнедеятельность, нельзя допускать образования его залежей, в противном случае его жизненный цикл резко сокращается. Поэтому, помимо содержания достаточного количества растворенного кислорода в иловой смеси необходимо обеспечивать её интенсивное перемешивание. Увеличение концентрации растворенного кислорода сверх максимальной пороговой меры не гарантирует увеличение качества очистки, степень активности микроорганизмов не возрастает.

Многочисленные испытания показывают, что среднепузырчатая аэрация обеспечивает идеальное соотношение кислородного режима и массобомы в хлопьях активного ила.

Оптимальный возраст активного ила составляет 7-10 суток, поскольку при этих его значениях обеспечивается наиболее эффективное качество очистки по всем обобщенным показателям загрязнения сточных вод (прозрачность, ХПК, БПК<sub>полн.</sub>). Однако процессы нитрификации и трансформации сложноокисляемых соединений (фенолы, анилин) протекают несколько эффективнее при поддержании возраста ила 15-20 суток.

Параметр окислительной мощности характеризует окисляемые органические соединения, удаляемые в единицу времени в единице объема аэротенка. Значение этого параметра показывает уровень удельной нагрузки на активный ил, скорости удаления загрязняющих веществ [9].



Этот параметр является показателем как удельной нагрузки на биомассу, так и удельной скорости её окисления. Т.е. потенциальной эффективности биодеструкции органической составляющей стока.

На городских очистных сооружениях этот параметр находится в диапазоне от 0,1 до 1,5 мг/(м<sup>3</sup>·сут).

Оптимальные значения температуры для удовлетворительного процесса биологической очистки находятся в диапазоне 16-23°C; максимально допустимые для обеспечения жизнедеятельности аэробных организмов — 36-38 °C; для специально адаптированных организмов — не более 40 °C.

Значение параметра рН сточных вод является важным показателем эффективности биологической очистки. Величина этого параметра оказывает большое влияние на токсическое воздействие загрязняющих веществ, которые содержатся во входном потоке, на биоценоз активного ила, его удовлетворительное функционирование. А также на состояние конструкций очистных сооружений.

Сточные воды в зависимости от рН подразделяются на сильнокислые, кислые, слабокислые, нейтральные, слабощелочные, щелочные и сильнощелочные. Величина рН сильнокислых жидкостей не превышает 3, кислых – варьируется в пределах 3-5, слабокислые имеют рН 5-6,5, нейтральные - 6,5-7,5, у слабощелочных этот параметр выше: 7,5-8,5, у щелочных рН = 8,5-9,5, сильнощелочные характеризуются величиной рН, превышающей 9,5.

Изменение активной реакции среды в ту или иную сторону от 6,5 до 8,5 недопустимо при приеме сточных вод в системы городской канализации [6]. Для благополучного протекания процесса биологической очистки необходима нейтральная реакция среды 6,5-7,8. Уровень рН, находящийся в допустимых пределах, оказывает благотворное влияние на образование флоккул активного ила, следовательно, и на отделение ила во вторичном отстойнике. Кислая реакция сточной жидкости приводит к распаду хлопьев

ила, вследствие чего ил плохо отделяется от очищенного стока. При критически низких значениях рН начинают активно развиваться грибы, конкурирующие с бактериями за питательные вещества. При высоких значениях рН микроорганизмы ила погибают.

Биогенные элементы являются обязательной составляющей раствора сточных вод, т.к. они обеспечивают стабильную жизнедеятельность микроорганизмов активного ила. Биогенные элементы содержатся в организмах и имеют определенное биологическое значение. К ним относят азот, серу, железо, фосфор, калий и т.д. Наиболее значимыми для развития биомассы являются азот, железо, сера, фосфор. Эти вещества называют микробиогенными, т.к. они в значительных количествах накапливаются в биомассе. В сухой массе ила может содержаться до 6-8% азота и 2% фосфора [10].

Такие элементы как Mg, K, Ca, Mo, Mn, Si и Co необходимы в микроскопических количествах для обеспечения клеточного метаболизма, поэтому они называются микробиогенными веществами. Накопление их в биомассе ила ничтожно, однако они очень важны, поскольку входят в состав ферментов ила и являются активными участниками метаболизма.

Главной задачей очистки стоков биологическим методом является удаление из сточных вод органических и минеральных примесей, которые могут быть растворены в сточной жидкости, или находиться в коллоидном или взвешенном состояниях.

Так как существует большое количество внешних и внутренних факторов, влияющих на протекание очистки (в течение суток может меняться состав и объем сточных вод; могут оказывать влияние погодные условия, неполадки или нештатные ситуации в технологическом цикле и т.д.), для обеспечения благоприятного протекания процесса очистки необходимо иметь возможность прогнозировать поведение системы.

Метод математического моделирования, основанный на описании происходящих во время очистки процессов – гидробиологических,

гидродинамических, гидрохимических – может быть использован для анализа, прогноза, а также управления и контроля за системой водоочистки.

### **Выводы по 1 главе:**

Проведен анализ особенностей процесса биологической очистки стоков на городских очистных сооружениях, определены особенности очистки на основе современного опыта и ведущих научных школ. При эксплуатации биологических очистных сооружений необходимо учитывать следующее:

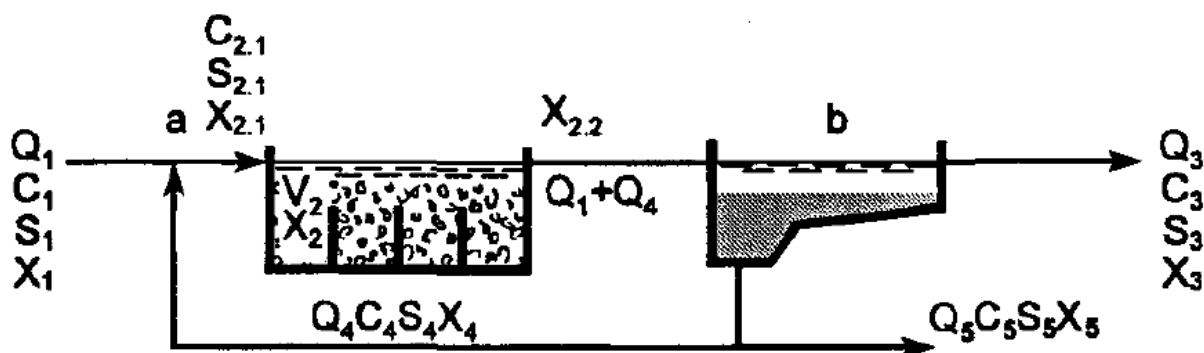
- гидробиологический состав биомассы активного ила, который осуществляет непосредственное окисление загрязняющих веществ в аэротенке;
- свойства биоценоза;
- процесс окисления загрязнений;
- условия и параметры протекания процесса;
- факторы, влияющие на протекание процесса.

На удовлетворительную жизнеспособность биоценоза активного ила и на протекание процесса биологической очистки оказывают влияние такие параметры сточной жидкости, попадающей на данный этап, как значение рН, концентрация растворенного кислорода, наличие биогенных элементов и токсичных соединений, нагрузка по органическим веществам. Т.о. для поддержания равновесия в системе и обеспечения высокого качества очистки необходимо контролировать упомянутые параметры. Регулировать состояние системы и прогнозировать её изменения при отклонении значений параметров от оптимальных возможно с помощью методов математического моделирования.

## Глава 2 Составление и анализ математической модели биологической очистки сточных вод

Любую динамическую систему с происходящими в ней превращениями можно описать с помощью математической модели. На рисунке 6 представлена схема очистки с активным илом, описывающая основные стадии протекания процесса биологической очистки. Концентрация взвешенных веществ в реакторе регулируется с помощью рециркуляции и удаления отработанного избыточного ила. Попадающие со сточной органические вещества покидают установки очистки исключительно в виде диоксида углерода, отработанной биомассы или в составе очищенного стока.

На рисунке 8 представлена схема биологической очистки, содержащая обозначения входных, выходных и промежуточных параметров, которые её характеризуют [52].



$Q$  – объемная скорость потока,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $C$  – общая концентрация (взвешенное + растворенное вещество),  $\text{г}/\text{м}^3$ ;  $S$  – концентрация растворенного вещества (концентрация субстрата),  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $X$  – концентрация взвешенных веществ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Рисунок 8 – Схема процесса очистки с активным илом

На основе отраженных на схеме параметров можно записать различные уравнения массового баланса для этой системы, на котором в последующем строится расчет характеристик для проектирования сооружений очистки, исследование её функционирования, изучение кинематических закономерностей процесса.

На начальном этапе построения математической модели необходимо обеспечить физическое описание исследуемого процесса. Описываемая система делится на составляющие её элементарные процессы, которые в ней происходят. После анализа отдельных процессов осуществляется математическое описание моделируемого объекта. На рисунке 9 приведено формирование математической модели в виде совокупности подсистем [56].



Рисунок 9 - Математическое описание объекта

В последние годы в нашей стране наблюдается тенденция увеличения использования методов математического описания процессов. Это связано в первую очередь с необходимостью оптимизации работы действующих сооружений и их реконструкции в силу ужесточения требований к качеству очищенных сточных вод.

Наиболее известными моделями в настоящее время считаются модели активного ила ASM1, ASM2 и ASM3, разработанные специалистами Международной ассоциации по исследованию и контролю очистки воды (IAWPRC). Модели характеризуют процессы изъятия из загрязненных стоков органики и биогенных веществ [59].

В 1987 г. группой исследователей во главе с Могенсом Хенце было предложено математическое описание систем очистки сточных вод, которое

теперь носит название ASM1 (модель активного ила № 1) [61]. На принципе этой модели в настоящее время базируется разработка моделей, создаваемых под конкретные узконаправленные производства. ASM1 также объединила систему обозначений, используемых в ходе математического описания разнообразных процессов.

В основу модели положены базовые модели Герберта и Моно. Модель наглядно показывает процессы роста и распада нитрифицирующих и денитрифицирующих бактерий. Кроме того, модель включает математическое описание процесса окисления, изменения щелочности, а также гидролиза органического вещества (разложения органического вещества в воде с образованием новых соединений) и аммонификацию (гниение).

Составлению математического описания выбранного процесса всегда предшествует описание его составляющих параметров. Модели реакторов биохимического окисления разделяются в зависимости от типа аппаратного оформления на несколько типов [49]:

1. Модель идеального смешения описывает процессы, протекающие в единичных аппаратах с мешалками, которые имеют небольшое отношение высоты к диаметру.
2. Модель идеального вытеснения, или диффузионная модель описывает процессы в аппаратах, которые имеют значительно большую длину в сравнении с диаметром.
3. Аппараты, состоящие из отдельных секций, а также каскады аппаратов с перемешиванием обычно описывают с помощью ячеечных моделей структуры потоков.

Таким образом, структура модели в значительной степени определяется конструктивными особенностями биохимического реактора. Все остальные типы реакторов – с рециклом, промежуточным отводом или подводом компонентов и т.д. – представляются различной комбинацией указанных моделей.

Требования, которые должны быть удовлетворены при составлении и использовании математических моделей:

1. Используемая модель позволяет проследить протекание процесса изъятия из стоков органических соединений и загрязняющих веществ, характерных для городских сточных вод и вод, близких к ним по составу. С её помощью можно определить с необходимой точностью концентрации примесей на выходе из системы в зависимости от этих значений на входе, параметров работы системы и других факторов.

2. Нормируемые показатели на входе в системы и на выходе из неё должны соответствовать требованиям природоохранного законодательства, например, содержание взвешенных веществ в исследуемой пробе должно быть выражено в единицах абсолютно сухого вещества, значение концентрации органических соединений должно быть выражено в БПК<sub>полн</sub> во взболтанной пробе.

3. Математическое описание исследуемого объекта не должно содержать такие параметры, для определения которых нужно будет прибегать к проведению экспериментов. Все учтенные параметры должны быть взяты из технических документов или приниматься как допущения.

4. Модель должна содержать все возможные управляемые параметры, например, расход воздуха и возвратного и избыточного ила, долю регенерации. Это необходимо для успешного применения разработанной модели в целях совершенствования и оптимизации технологического процесса.

5. В модели должны быть отражены все параметры и факторы, оказывающие влияние на эффективность процесса очистки в системе с активным илом.

Для корректной реализации заданных целей могут применяться усовершенствованные методы системного анализа. Системный анализ базируется на математическом описании исследуемого процесса, с помощью которого можно спрогнозировать поведение системы, рассматривая ее с

разных позиций: гидродинамической структуры, кинетики массопередачи и синтеза и накопление новых клеток, кинетики удаления из стоков загрязняющих веществ. Затем формируется полная математическая модель, учитывающая все изложенные выше параметры.

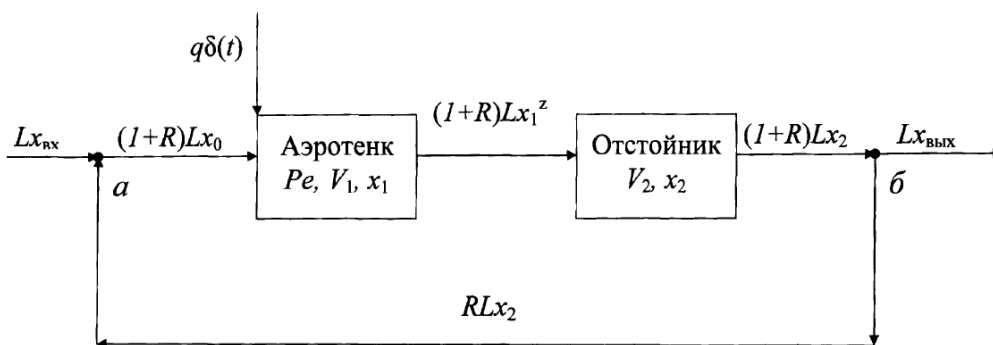
## **2.1 Математическое описание гидродинамики потоков в сооружениях биологической очистки**

Поведение потоков жидкостей в реальных аппаратах подвергается действию множества различных сил, в результате чего в настоящее время отсутствует их корректное математическое описание. Общеизвестно, что организация жидкостных потоков оказывает определяющее влияние на результаты химико-технологических процессов, в связи с чем необходимость описания гидродинамики в общей системе математического описания процесса становится очевидной. Данные модели структуры потоков являются основой, на которой базируется построение целостной математической модели химико-технологических явлений.

В 2009 году профессорами Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева были осуществлены исследования гидродинамики структуры потока жидкости в системе аппаратов биологической очистки с математическим описанием и аналитическим решением. В работе был осуществлен перенос методологии исследований гидродинамики массообменных аппаратов на систему аэротенк-отстойник с рециклом (рисунок 10) [44].

Импульсный метод изучения потока был выбран с целью исследования структуры потоков в системе. Метод заключается в измерении колебаний концентраций индикатора, вводимого в аэротенк на входе потока.





а, б - точки смешения

$L$  - расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $Pe$  – число Пекле;  $R$  – коэффициент рециркуляции;  $V_1, V_2$  - объемы аэротенка и отстойника, м<sup>3</sup>;  $x_i$  - концентрация индикатора в соответствующих зонах, г/м<sup>3</sup>;  $q\delta(t)$  - количество индикатора при импульсной подаче его на входе; а, б - точки смешения

Рисунок 10- Система гидродинамических потоков в системе, представленной аэротенком и вторичным отстойником

Из представленной схемы видно, что математическое описание исследуемой системы подразумевает взаимодействие соединенных последовательно диффузионной зоны, представленной аэротенком, и зоны идеального смешения, представленной отстойником. Рециркулирующий поток соединяет выход отстойника со входом аэротенка (рисунок 11).

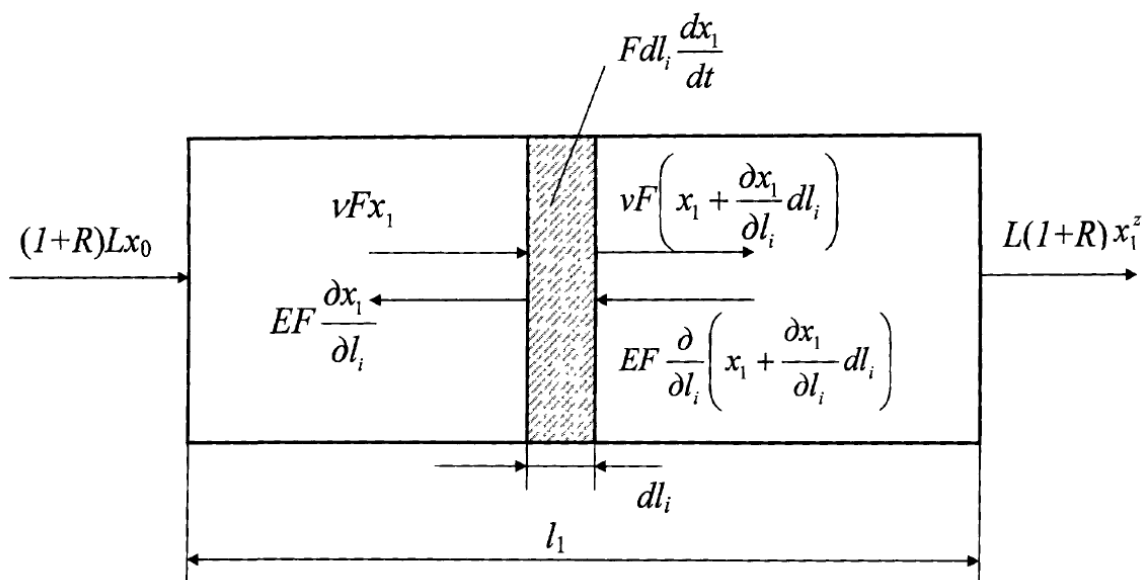


Рисунок 11 - Схема потоков для элемента  $dl_i$  в процессе диффузии

С учетом представленных на рисунке обозначений математическая модель структуры потока жидкости может быть записана в виде материальных балансов для каждой зоны следующей системой уравнений.

I. Диффузионная зона  $V_1$  – аэротенк (схема потоков для элемента  $dl_i$  в процессе диффузии приведена на рисунке 11).

Из материального баланса для элемента  $dl$ :

$$EF \frac{\partial x_1}{\partial l_i} + EF \frac{\partial^2 x_1}{\partial l_i^2} dl_i + Fvx_i - vFx_1 - vF \frac{\partial x_1}{\partial l_i} dl_i - EF \frac{\partial x_1}{\partial l_i} = Fdl_i \frac{\partial x_1}{\partial t} \quad (6)$$

После сокращения получим:

$$E \frac{\partial^2 x_1}{\partial l_i^2} - v \frac{\partial x_1}{\partial l_i} = F \frac{\partial x_1}{\partial t} \quad (7)$$

Введем значения скорости потока ( $v = (1 + R)L/F$ ) и безразмерной длины пути жидкости ( $z = l_i/l_1$ ), разделим обе части этого уравнения на  $E$  и умножим обе части уравнения на  $l_1^2$ , в итоге получим:

$$\frac{\partial^2 x_1}{\partial l_i^2} - \frac{(1 + R) \cdot Ll_1}{EF} \cdot \frac{\partial x_1}{\partial z} = \frac{F \cdot (1 + R) \cdot Ll_1 l_1}{E \cdot F \cdot (1 + R) \cdot L} \cdot \frac{\partial x_1}{\partial t} \quad (8)$$

С учетом того, что  $Pe = \frac{vl_1}{E} = \frac{(1+R) \cdot Ll_1}{E \cdot F}$  и  $V_1 = Fl_1$ , уравнение диффузии (8) приводится к виду:

$$\frac{\partial^2 x_1}{\partial l_i^2} - Pe \frac{\partial x_1}{\partial t} = Pe \frac{V_1}{(1 + R) \cdot L} \cdot \frac{\partial x_1}{\partial t} \quad (9)$$

II. Зона полного перемешивания  $V_2$  – отстойник.

Из уравнения материальных балансов (рисунок 10):

$$L(1 + R)x_1^2 - L(1 + R)x_2 = V_2 \frac{\partial x_2}{\partial t} \quad (10)$$

III. Зона смешения в точке «а».

Из уравнения материальных балансов (рисунок 10):

$$Lx_{\text{вх}} + RLx_2 - L(1 + R)x_0 = 0 \quad (11)$$

IV. Зона смешения в точке «б» (рисунок 10).

$$(1 + R)Lx_2 - RLx_2 - Lx_{\text{вх}} = 0 \quad (12)$$

откуда  $x_2 = x_{\text{вх}}$

Граничные условия для диффузионной зоны определяем также из материальных балансов.

На входе потока жидкости в диффузионную зону (рисунок 12 (а)):

$$l_i = 0; L(1 + R)x_0 + EF \frac{\partial x_1}{\partial l_i} + q\delta(t) = L(1 + R)x_1 \quad (13)$$

или в безразмерном виде:

$$z = 0; L(1 + R)x_0 + \frac{EF \partial x_1}{l_i \partial z} + q\delta(t) = L(1 + R)x_1 \quad (14)$$

откуда:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dz} &= \frac{L(1 + R)l_i}{EF} x_1 - \frac{L(1 + R)l_i}{EF} x_0 - \frac{q\delta(t)l_i}{EF} = Pe \left[ x_1 - x_0 - \frac{q\delta(t)}{L(1 + R)} \right] \\ &= Pe(x_1 - x_0) \end{aligned} \quad (15)$$

При импульсном вводе индикатора на входе потока:  $\frac{q\delta(t)}{L(1+R)} = 0$ .

На выходе потока жидкости из диффузионной зоны (рисунок 12(б)):

$l_i = l_1$  или  $z = 1$ ;

$$L(1 + R)Lx_1^2 - EF \frac{dx_1}{dl_i} = L(1 + R)x_1, \text{ откуда} \quad (16)$$

$$\frac{dx_1}{dl_i} = 0 \text{ или } \frac{dx_1}{dz} = 0. \quad (17)$$

### 2.1.1 Решение математической модели

Для определения среднего времени пребывания потока ( $\tau$ ) из соответствующих зон (аэротенк, отстойник) необходимо знать начальный момент нулевого порядка ( $I = \int_0^\infty x dt$ ) и первого порядка ( $J = \int_0^\infty xtdt$ ), поскольку  $\tau = \int_0^\infty xtdt / (\int_0^\infty x dt) = \frac{J}{I}$ . На рисунке 12 показаны граничные условия структуры потока жидкости для диффузионной зоны (аэротенк).

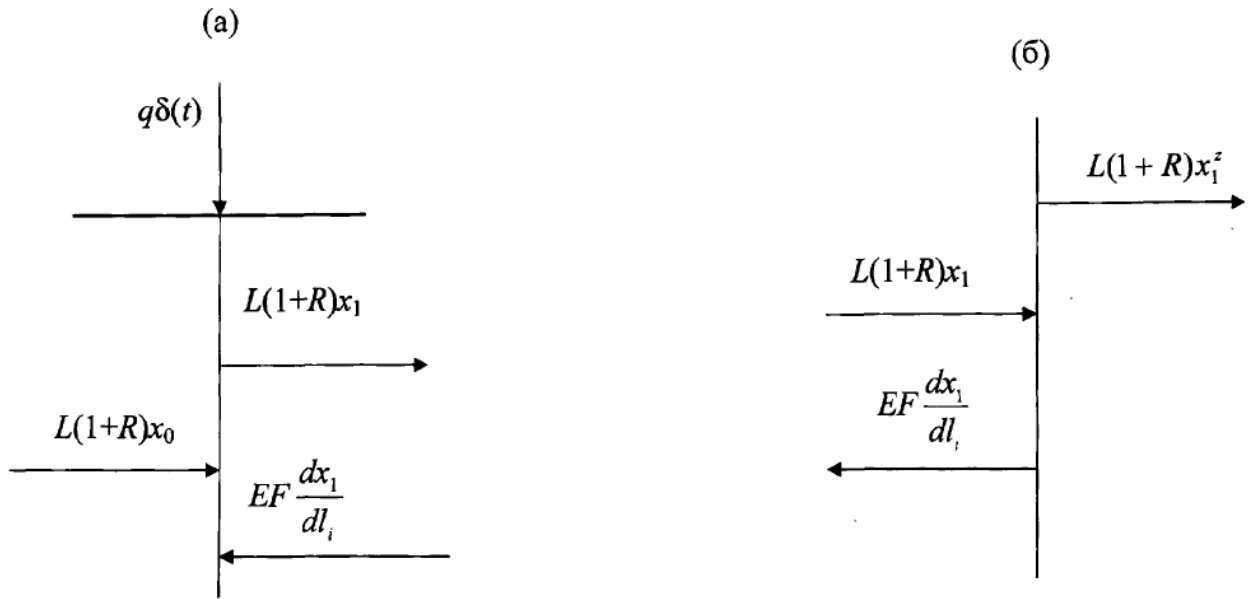


Рисунок 12 - Граничные условия структуры потока жидкости для диффузионной зоны (аэротенк): (а), на входе потока; (б), на выходе потока

С этой целью умножим исходную систему уравнений (2)-(5) и граничные условия (16)-(17) на  $t$  и проинтегрируем по  $t$  от 0 до  $\infty$ .

Для диффузионной зоны получим следующее уравнение:

$$\int_0^{\infty} t \frac{\partial^2 x_1}{\partial z^2} dt - Pe \int_0^{\infty} -t \frac{\partial x_1}{\partial z} dt = Pe \frac{V_1}{L(1+R)} \int_0^{\infty} t \frac{\partial x}{\partial t} dt \quad (18)$$

Система уравнений (9)-(12) после интегрирования уравнения диффузии (8) приобретает вид

$$\frac{d^2 J_1}{dz^2} - Pe \frac{dJ_1}{dz} = -Pe \frac{V_1}{L(1+R)} I_1; \quad (19)$$

$$(L(1+R)J_1^z - L(1+R)J_2 = -V_2 I_2 \quad (20)$$

$$J_2 = J_{\text{вых}} \quad (21)$$

$$LJ_{\text{вх}} + RLJ_2 = L(1+R)J_0 \quad (22)$$

$$LJ_{\text{вх}} = 0 \quad (23)$$

В результате решения этой системы уравнений имеем

$$J_{\sigma_{\text{вых}}} = \frac{V_1^2 I}{(1+R)L^2} \left[ 1 + \frac{2}{Pe} + \frac{2 - 2\exp(-Pe)}{Pe^2} \right] + \frac{2V_2(V_1 + V_2)I}{L^2} \quad (24)$$

Так как дисперсия  $\sigma_{\theta}^2$  по определению равна

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{J_{\sigma_{\text{вых}}}}{I\tau^2} - 1 \quad (25)$$

то после подстановки значения  $J_{\sigma_{\text{вых}}}$  получим

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\xi_1^2}{(1+R)} \left[ 1 + \frac{2}{Pe} + \frac{2 - 2\exp(-Pe)}{Pe^2} \right] + 2\xi_2 - 1 \quad (26)$$

Уравнение (26) выражает зависимость дисперсии функции отклика системы на импульсное возмущение по составу потока от параметров математической модели -  $Pe, R, \xi_1, \xi_2$  ( $\xi_1 = 1 \xi_2$  и  $R = 0$ ).

Число Пекле ( $Pe$ ) определяем либо по методу установившегося состояния, либо по С-кривой на выходе аэротенка, с учетом допущения  $\xi_1 = 1 \xi_2$  и  $R = 0$ . При этом зависимость для диффузионной модели выглядит следующим образом:

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{2}{Pe} - \frac{2 - 2\exp(-Pe)}{Pe^2} \quad (27)$$

Величину рецикла  $R$  можно определить из формулы (18) при известном числе Пекле по методу моментов функции распределения времени пребывания по длине пути жидкости:

$$1 + R = \frac{\xi_1 \tau_{\text{ап}}}{\tau_1} \left[ z + \frac{1}{Pe} + \frac{\exp Pe(z-1)}{Pe} \right]; \frac{J_0}{I} = 0 \quad (28)$$

$$\text{при } z = 0, R = \frac{\xi_1 \tau_{\text{ап}}}{\tau_1} \left[ \frac{1 - \exp(-Pe)}{Pe} \right] - 1 \quad (29)$$

Величины  $\tau_1$  и  $\tau_{\text{ап}}$  определяют по С-кривым на выходе из аэротенка ( $\tau_1$ ) и отстойника ( $\tau_{\text{ап}}$ ). Импульсное возмущение наносится на входе аэротенка.

Величина рецикла может быть вычислена также из формулы (26) по методу импульсного возмущения по составу потока:

$$R = \frac{\xi_1^2 \left[ 1 + \frac{2}{Pe} + \frac{2 - 2\exp(-Pe)}{Pe^2} \right]}{\sigma_{\theta}^2 - 2\xi_2 + 1} - 1 \quad (30)$$

Выведенные уравнения зависимости позволяют выявить степень изменения дисперсии  $\sigma_{\theta}^2$  от параметров модели: доли рециркулирующего потока  $R$ , числа Пекле  $Pe$ , характеризующего отношение скорости потока к

приведенной скорости молекулярной диффузии, а также соотношение размеров аэротенка и отстойника.

Коэффициент дисперсии – мера области простираения растворенного вещества в заданном направлении, он характеризует поведение растворенного вещества в конкретной среде. Коэффициент дисперсии находится в пределах между нулем и единицей ( $0 \geq \sigma_{\theta}^2 \leq 1$ ), при этом значению  $\sigma_{\theta}^2 = 1$  соответствует режим полного перемешивания (наименее желательный), а значению  $\sigma_{\theta}^2 = 0$  – идеального вытеснения (наиболее желательный).

Анализ системы уравнений показал, что все параметры модели структуры жидкости влияют на дисперсию  $\sigma_{\theta}^2$  по-разному (рисунок 13.1).

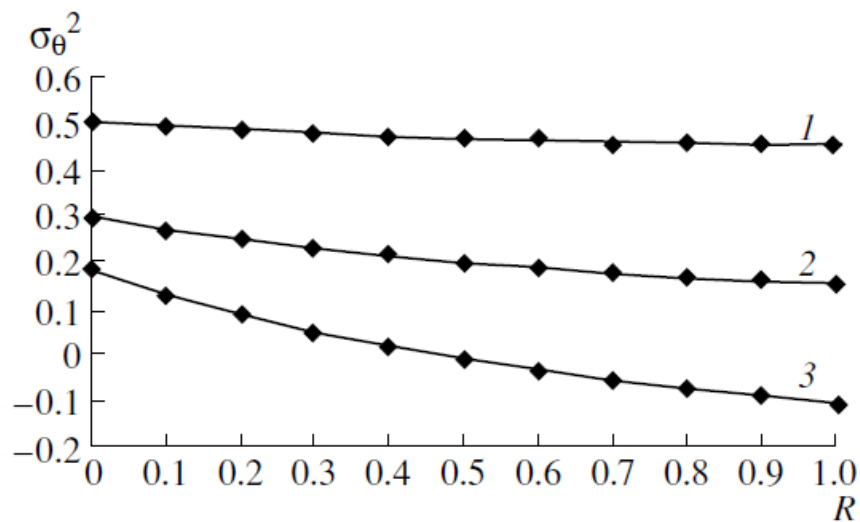


Рисунок 13.1 – при  $Re = 10$  кривая 1 соответствует соотношению

$$\xi_1/\xi_2 = 0.3/0.7; 2 - \xi_1/\xi_2 = 0.5/0.5; 3 - \xi_1/\xi_2 = 0.7/0.3$$

Из рисунка 13.1 видно, что соотношение долей объемов зон аэротенка и отстойника в сторону увеличения последнего до 0.3/0.7 нежелательно, так как дисперсия возрастает.

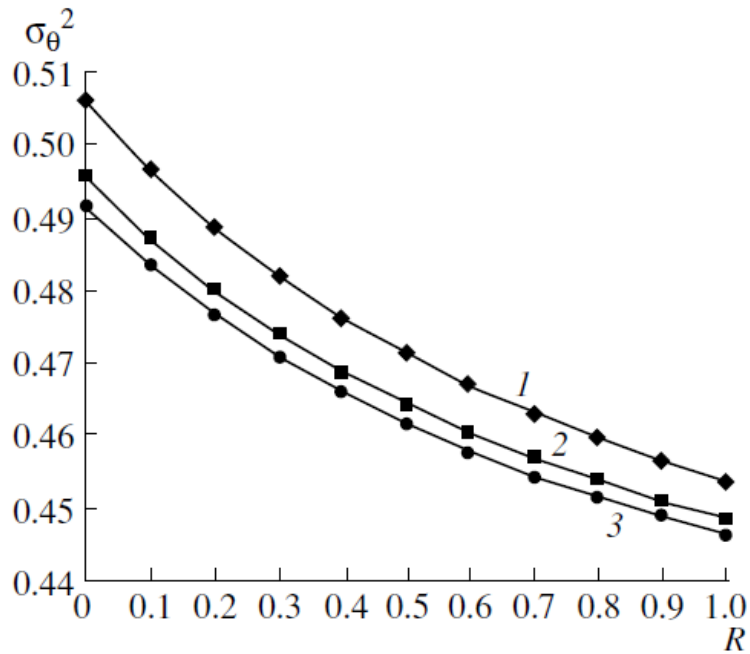


Рисунок 13.2 – Зависимость параметров модели при  $\xi_1/\xi_2 = 0.3/0.7$ , где кривая 1 –  $Pe = 10$ ; 2 –  $Pe = 30$ ; 3 –  $Pe = 100$

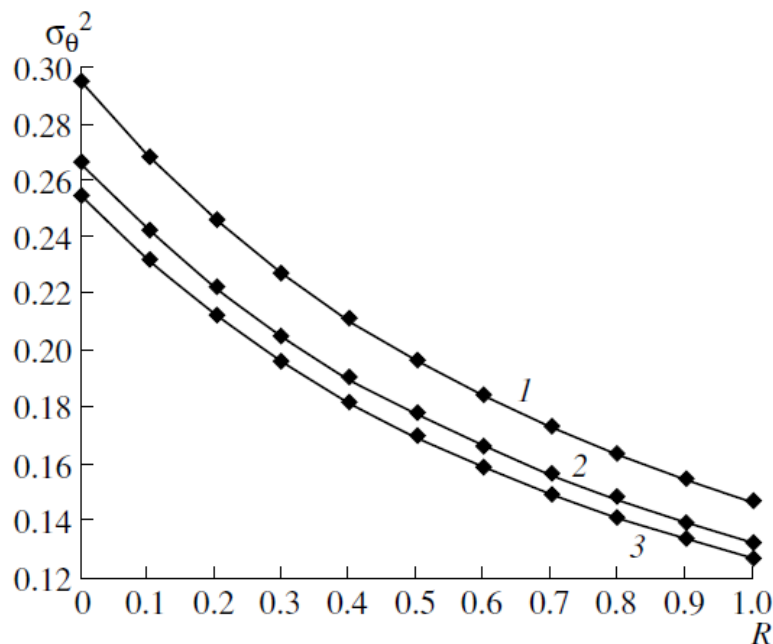


Рисунок 13.3 – Зависимость параметров модели при  $\xi_1/\xi_2 = 0.5/0.5$ , где кривая 1 –  $Pe = 10$ ; 2 –  $Pe = 30$ ; 3 –  $Pe = 100$

Анализ влияние числа Пекле ( $Pe = 30 - 100$ ) при худших соотношениях долей объемов аэротенка и отстойника ( $0.5:0.5$  и  $0.3:0.7$ ) (рисунки 13.2 и 13.3) показал, что интенсификация потока жидкости до  $Pe > 10$  в аэротенке и отстойнике не даст желаемого результата. Достаточно достигнуть  $Pe = 10$  и

рецикла  $R \geq 0.5$ , чтобы получить оптимальный диапазон соотношений объемов зон -  $0.6:0.4 \leq \xi_1:\xi_2 \leq 0.65:0.35$ , что соответствует на рисунке 13.4 диапазону  $1.5 \leq \xi_1:\xi_2 \leq 2$ .

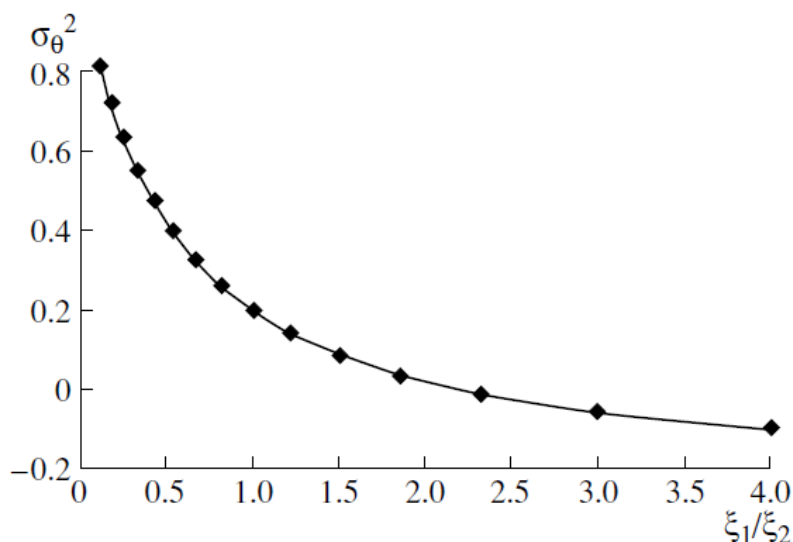


Рисунок 13.4 - Зависимость дисперсии  $\sigma_\theta^2$  от соотношения  $\xi_1:\xi_2$  при  $Re = 10$  и  $R = 0.5$

Полученный анализ позволяет на стадии проектирования определить оптимальные режимы работы и конструктивные параметры аппаратов с целью энерго- и ресурсосбережения. При модернизации существующих сооружений с целью интенсификации процесса биологической очистки появляется возможность вносить технологические изменения в процесс, не затрагивая основных мощностей установок, но при этом корректируя процесс в необходимом направлении.

Анализ модели выявил важный параметр системы биологической очистки: соотношение долей объемов аэротенка и вторичного отстойника - 0.7:0.3. Для рассматриваемых очистных сооружений поддержание этого соотношения не представляет большой сложности, т.к. проектом предусмотрено соотношение 0.73:0.27. Необходимо лишь следить, чтобы фактический объем стоков не отклонялся от проектного.



## 2.2 Математическое описание кинетики удаления загрязнений и роста биомассы

Кроме гидродинамики потоков в системе биологической очистки модель процесса также характеризует материальный баланс и кинетика процесса удаления загрязняющих веществ.

Рост биомассы и удаление загрязнений удобнее всего рассматривать с позиции ячеечной модели. Ячеечная модель описывает поток сточной жидкости в аэротенке в виде последовательно соединенных ячеек. В каждой из них соблюдается режим полного смешения, параметры в каждой точке одинаковые. Между собой ячейки не смешиваются. Главным параметром такой модели является число ячеек  $N$ . Если ячейка в системе одна, то модель базируется на параметрах идеального смешения, и идеального вытеснения, если их больше [46].

Наглядная схема аэротенка-вытеснителя, описываемого с позиции ячеечной модели, представлена на рисунке 14.

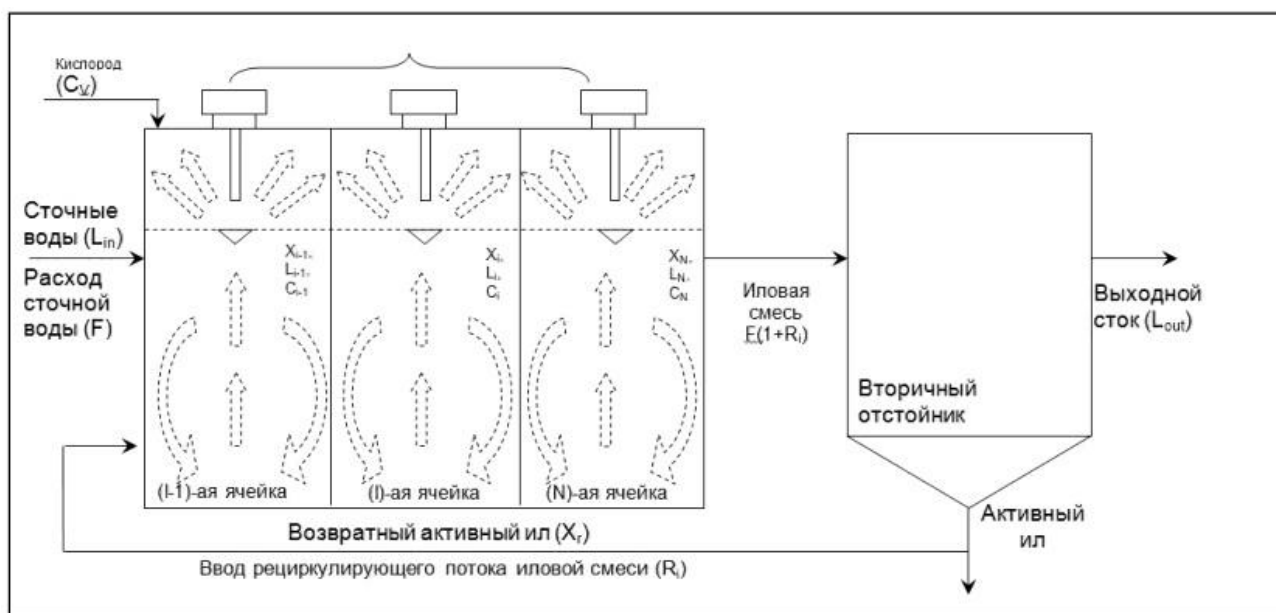


Рисунок 14 - Упрощенная схема аэротенка вытеснителя ячеечной структуры

Математическое описание системы биологической очистки начинается с описания кинетики роста микроорганизмов, т.к. они являются ядром системы. Процесс очистки протекает в аэротенках при непосредственном

контакте сточных вод с биомассой при обеспечении определенного кислородного режима. В процессе очистки микроорганизмы претерпевают различные ферментативные реакции. На последнем этапе активный ил отделяется от очищенного стока во вторичном отстойнике [42].

Динамика роста популяций характеризует временное изменение концентрации микроорганизмов биомассы ( $\frac{dx}{dt}$ ). Модель Моно – это наиболее простая математическая модель, описывающая эту динамику. Модель характеризует лимитирующее действие субстрата.

$$\frac{dx}{dt} = V \cdot x \quad (31)$$

где  $x$  – биомасса, г/л;  $V$  - удельная скорость роста микроорганизмов, подчиняющаяся закону Михаэля-Ментен:

$$V = V_{max} \cdot \frac{S}{K_M + S} \quad (32)$$

где  $V_{max}$  – максимальная удельная скорость роста микроорганизмов;  $S$  – концентрация субстрата;  $K_M$  – константа полунасыщения, т.е. такая концентрация субстрата, при которой удельная скорость роста принимает значение половины максимальной.

На рисунке 15 показан график, иллюстрирующий уравнение Михаэлиса-Ментен.

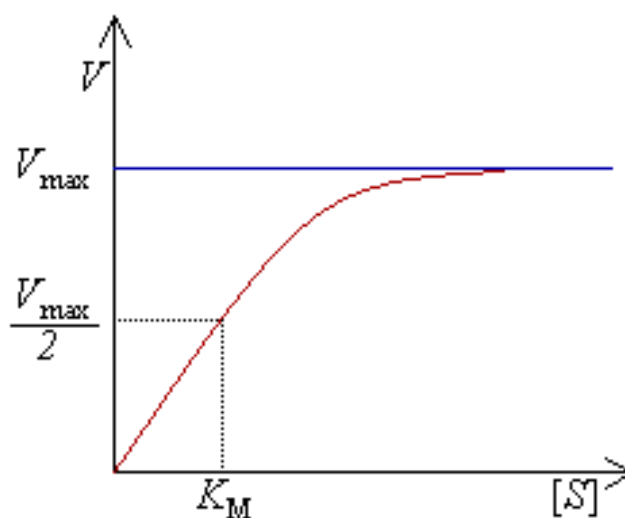


Рисунок 15 – Графическое изображение закона Михаэлиса-Ментен

Концентрация и соотношение загрязняющих веществ и биомассы, содержащей активный ил, не являются константой и постоянно изменяются. Проблема поддержания их соотношения в определенных границах в настоящее время является актуальной, так как нарушение этого соотношения грозит высокой концентрацией загрязнителя после окончания процесса очистки, либо недопустимо высоким содержанием биомассы ила, на утилизацию которой потребуются дополнительные денежные и временные вложения.

$L_{max}$  и  $X_{max}$  отражают предельное содержание загрязняющих веществ и биомассы активного ила соответственно. Для достижения стабилизации процесса необходимо, чтобы эти значения концентраций находились в допустимом диапазоне, не достигая критических значений:

$$\begin{cases} L(t) \leq L_{max}, \\ X(t) \leq X_{max}. \end{cases} \quad (33)$$

Математическая модель, которая описывает процессы очистки жидких стоков биологическими методами, представляет собой систему дифференциальных уравнений материального баланса. Она характеризует кинетику поглощения органических соединений и других загрязняющих веществ микроорганизмами активного ила, изменение концентрации биомассы в иловой смеси и содержание растворенного кислорода в системе [43]:

$$\frac{dL_{out}^j}{dt} = \frac{Q \cdot (1 + R_i)}{V} \cdot (L_{out(i-1)}^j - L_{out(i)}^j) + R_{Li}^j \quad (34)$$

где  $L_{out(i)}^j$  и  $L_{out(i-1)}^j$  – концентрация  $j$ -го компонента в рассматриваемой  $i$ -й ячейке и в предыдущей, мг/л;  $Q$  – расход поступающей сточной воды, м<sup>3</sup>/ч;  $V$  – объем ячейки, м<sup>3</sup>;  $R_i$  – коэффициент рециркуляции активного ила;  $R_{Li}^j$  – скорость потребления  $j$ -го субстрата в  $i$ -й ячейке, мг/л·ч.

Объем ячейки вычисляется по формуле:

$$V = V_a / N_a \quad (35)$$

где  $V_a = 1366,6 \text{ м}^3/\text{ч}$  – объемный расход сточных вод;

$N_a = 1$  – количество ячеек.

$$V = \frac{673,275}{1} = 673,275 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Степень рециркуляции активного ила в аэротенках рассчитывается по формуле:

$$R_i = \frac{a_i}{\frac{1000}{J_i} - a_i} \quad (36)$$

где  $a_i = 5 \text{ г/л}$  – доза ила в аэротенке;

$J_i = 120 \text{ см}^3/\text{г}$  – иловый индекс.

Подставляем значения в формулу (15) и производим расчет:

$$R_i = \frac{5}{\frac{1000}{120} - 5} = 1,5.$$

Удельная скорость окисления субстрата рассчитывается по формуле:

$$R_{Li}^j = R_{max} \cdot \frac{L_{ex} \cdot C_0}{L_{ex} \cdot C_0 + K_i \cdot C_0 + K_0 \cdot L_{ex}} \cdot \frac{1}{1 + \varphi \cdot a_i} \quad (37)$$

где  $R_{max}$  – максимальная скорость окисления, мгБПК<sub>полн</sub>/(г·ч);

$L_{ex} = 30 \text{ мг/л}$  – значение БПК<sub>полн</sub> в очищенном стоке;

$C_0 = 1 \text{ мг/л}$  – содержание растворенного кислорода в иловой смеси;

$K_i$  – константа, характеризующая свойства органических загрязняющих веществ, мгБПК<sub>полн</sub>/л;

$K_0$  – константа, характеризующая влияние кислорода, мгО<sub>2</sub>/л;

$\varphi$  – коэффициент ингибирования продуктами распада активного ила, л/г;

$a_i = 5 \text{ г/л}$  – доза ила.

Для городских сточных вод принимаем:  $R_{max} = 85 \text{ мгБПК}_{\text{полн}}/(\text{г}\cdot\text{ч})$ ;

$K_i = 33 \text{ мгБПК}_{\text{полн}}/\text{л}$ ;  $K_0 = 0,625 \text{ мгО}_2/\text{л}$ ;  $\varphi = 0,07$ .

Тогда формула (37) имеет вид:

$$R_{Li}^j = 85 \cdot \frac{3,54 \cdot 1}{3,54 \cdot 1 + 33 \cdot 1 + 0,625 \cdot 3,54} \cdot \frac{1}{1 + 0,07 \cdot 5} = 5,7 \text{ мг/л}\cdot\text{ч}.$$

Для решения уравнения (34) в качестве краевых условий приняты параметры первой ячейки:

$$L_{out(i-1)} = \frac{(L_{out} \cdot R_i + L_{in})}{(1 + R_i)}, \quad (38)$$

где  $L_{in} = 120$  мг/л – концентрация j-го компонента в поступающей на очистку воде.

Тогда:

$$L_{out(i-1)} = (84 \cdot 1,5 + 120) \cdot (1 + 2,5) = 98,4 \text{ мг/л.}$$

Изменение концентрации биомассы активного ила находим следующим образом:

$$\frac{dX_i}{dt} = \frac{Q \cdot (1 + R_i)}{V} \cdot (X_{i-1} - X_i) + V_{xi}, \quad (39)$$

где  $X_i$  и  $X_{i-1}$  – концентрация активного ила в рассматриваемой i-й ячейке и в предыдущей, г/л;

$V_{xi}$  – скорость накопления активного ила, г/л·ч.

Скорость роста микроорганизмов (скорость накопления активного ила) рассчитывается по формуле (32), подставляя значения в которую, получаем:

$$V_{xi} = 5,5 \cdot \frac{84}{93 + 84} = 0,47 \text{ г/л·ч.}$$

Параметры первой ячейки рассчитываются по следующей формуле:

$$X_{i-1} = X_r \cdot \frac{R_i}{(1 + R_i)}, \quad (40)$$

где  $X_r = 12$  г/л – концентрация активного ила в рециркуляционном потоке.

Подставив имеющиеся значения в формулу (19) и произведя расчет, получим:

$$X_{i-1} = 12 \cdot \frac{1,5}{(1 + 1,5)} = 7,5 \text{ г/л.}$$

Динамика изменения концентрации растворенного кислорода описывается следующим уравнением:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{Q \cdot (1 + R_i)}{V} \cdot (C_{i-1} - C_i) + KLa \cdot (C_a - C_i) + R_{ci}, \quad (41)$$

где  $C_i$  и  $C_{i-1}$  – концентрация растворенного кислорода в рассматриваемой  $i$ -й ячейке и в предыдущей, мг/л;

$KLa$  – коэффициент массопередачи кислорода,  $ч^{-1}$ ;

$C_a$  – концентрация насыщения воды кислородом при заданных температуре и давлении, мг/л;

$R_{ci}$  – скорость потребления кислорода,  $мгO_2/л \cdot ч$ .

В качестве краевых условий приняты следующие параметры первой ячейки:

$$C_{i-1} = \frac{(C_{sv} + C_{vi} \cdot R_i)}{(1 + R_i)}, \quad (42)$$

где  $C_{sv}$ ,  $C_{vi}$  – содержание растворенного кислорода во входном потоке жидкости и в активном иле, находящемся в регенераторе, мг/л. Если преаэрация отсутствует, принимают  $C_{sv} = 0$ ;  $C_{vi} = 0,8$ .

Нахождение значения концентрации растворенного кислорода принимает следующий вид:

$$C_{i-1} = \frac{(0 + 0,8 \cdot 1,5)}{(1 + 1,5)} = 0,48.$$

Принимая во внимание граничные условия (33), математическое описание процесса очистки биологическим методом представлено в виде следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dL_{out}^j}{dt} = \frac{Q \cdot (1 + R_i)}{V} \cdot (L_{out(i-1)}^j - L_{out(i)}^j) + R_{Li}^j, \\ \frac{dX_i}{dt} = \frac{Q \cdot (1 + R_i)}{V} \cdot (X_{i-1} - X_i) + V_{xi}, \\ \frac{dC_i}{dt} = \frac{Q \cdot (1 + R_i)}{V} \cdot (C_{i-1} - C_i) + KLa \cdot (C_a - C_i) + R_{ci}, \\ L(t) \leq L_{max}, \quad X(t) \leq X_{max}. \end{array} \right. \quad (43)$$

Расчет проводится по приоритетным загрязнениям: нефтепродукты, сульфаты, железо общее, взвешенные вещества, ионы аммония, ПАВ, а также по БПК<sub>полн</sub>.

Для функционирования модели представлена система уравнений, которая характеризует кинетику протекания процесса окисления загрязнений и роста микроорганизмов активного ила в аэротенке. Расчет выполнен в программе Mathcad, алгоритм решения приведен ниже (рисунок 16, 16.1, 16.2). В первом случае расчет выполнен с начальными значениями, которые соответствуют максимальным значениям концентраций приоритетных загрязняющих веществ, которые были отмечены при работе очистных сооружений. Расчет показывает, что за время пребывания сточных вод в аэротенке (полный временной интервал нахождения иловой смеси в аэротенке принят за единицу) показатели концентраций снизились, но предельно допустимых не достигли. Выбранные загрязняющих вещества с указанными концентрациями во входном стоке могут надолго вывести работу сооружений из равновесия. На рисунке 17 изображена таблица решений, полученная с помощью программы Mathcad. На рисунках 18, 19 показаны изменения содержания приоритетных загрязняющих веществ и концентрации биомассы.

Исходные данные:

<u>ORIGIN := 1</u>			$X :=$	170
<u>R</u> := 1.5	B0 := 0	PAV0 := 0		220
<u>V</u> := 882	Vv0 := 0	Fe0 := 0		139
Q := 673.275	S0 := 0	Neft0 := 0		41.3
Rc := 7.26	Ia0 := 0	E0 := 8.6		4.93
Ri := 3.1				4.4
			11	
			5	

Рисунок 16. – Алгоритм построения задачи с помощью программы Mathcad

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} B1 &:= \left[ \frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (B1 - B0) + Rc & \frac{d}{dt} PAV1 &:= \left[ \frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (PAV1 - PAV0) + Rc \\
\frac{d}{dt} Vv1 &:= \left[ \frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (Vv1 - Vv0) + Rc & \frac{d}{dt} Fe1 &:= \left[ \frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (Fe1 - Fe0) + Rc \\
\frac{d}{dt} S1 &:= \left[ \frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (S1 - S0) + Rc & \frac{d}{dt} Neft1 &:= \left[ \frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (Neft1 - Neft0) + Rc \\
\frac{d}{dt} Ia1 &:= \left[ \frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (Ia1 - Ia0) + Rc & \frac{d}{dt} E1 &:= \left[ \frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (E1 - E0) + Ri
\end{aligned}$$

Рисунок 16.1 – Алгоритм построения задачи с помощью программы Mathcad

$$D(x, X) := \begin{bmatrix} \left[ \frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (B0 - X_1) + Rc \\ \left[ \frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (Vv0 - X_2) + Rc \\ \left[ \frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (S0 - X_3) + Rc \\ \left[ \frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (Ia0 - X_4) + Rc \\ \left[ \frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (PAV0 - X_5) + Rc \\ \left[ \frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (Fe0 - X_6) + Rc \\ \left[ \frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (Neft0 - X_7) + Rc \\ \left[ \frac{Q \cdot (1 + R)}{V} \right] \cdot (E0 - X_8) + Ri \end{bmatrix}$$

Рисунок 16.2 – Алгоритм решения поставленной задачи с помощью программы Mathcad



$z := \text{rkfixed}(X, 0, 1, 10, D) =$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	170	220	139	41.3	4.93	4.4	11	5
2	0.1	141.127	182.44	115.512	34.786	4.734	4.297	9.75	5.908
3	0.2	117.269	151.405	96.105	29.403	4.573	4.211	8.717	6.658
4	0.3	97.557	125.763	80.07	24.956	4.439	4.14	7.863	7.277
5	0.4	81.269	104.575	66.82	21.281	4.329	4.082	7.158	7.789
6	0.5	67.811	87.068	55.872	18.245	4.238	4.034	6.576	8.212
7	0.6	56.691	72.602	46.826	15.736	4.163	3.994	6.094	8.562
8	0.7	47.503	60.65	39.352	13.663	4.1	3.961	5.696	8.851
9	0.8	39.911	50.774	33.176	11.95	4.049	3.934	5.368	9.089
10	0.9	33.638	42.614	28.073	10.535	4.006	3.911	5.096	9.287
11	1	28.455	35.871	23.857	9.366	3.971	3.893	4.872	9.45

Рисунок 17 – Таблица решений, полученная с помощью программы Mathcad

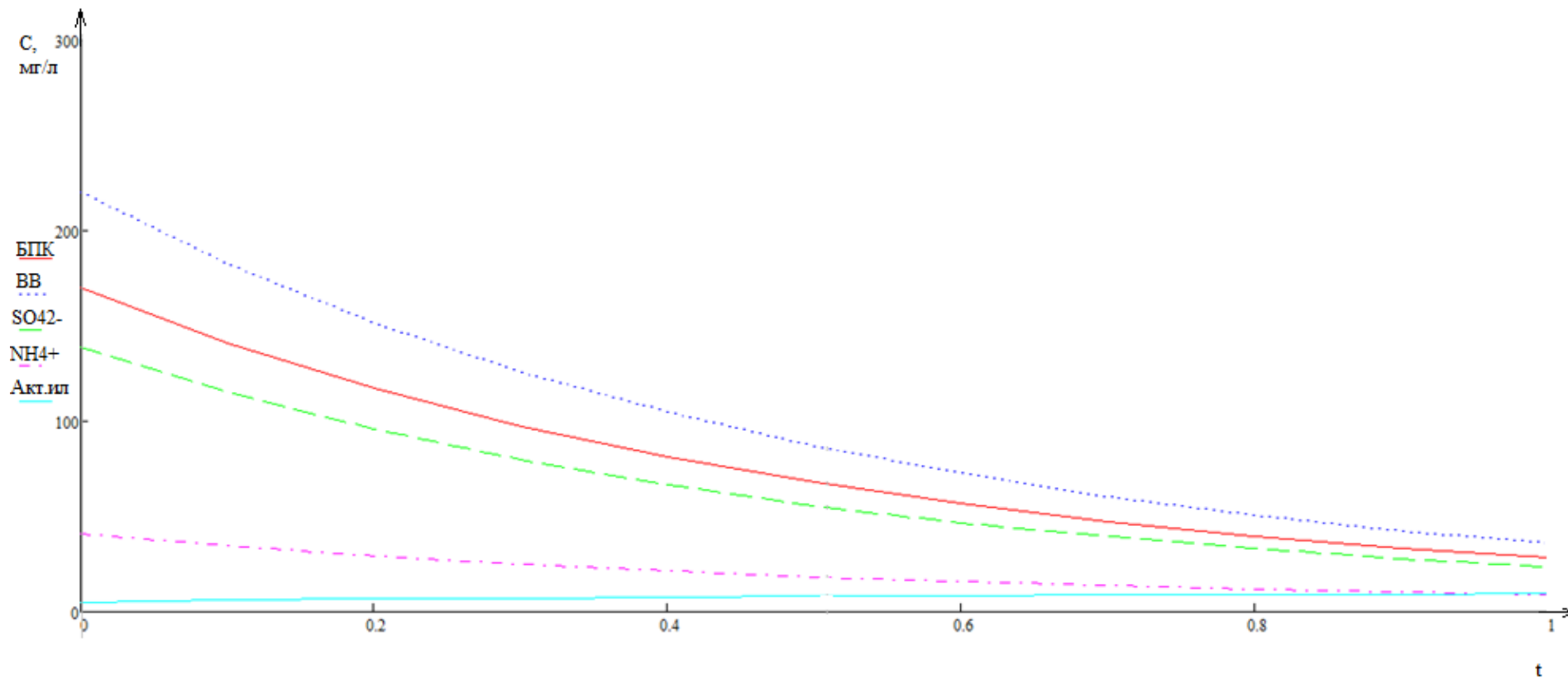


Рисунок 18 –Изменения содержания приоритетных загрязняющих веществ и концентрации биомассы

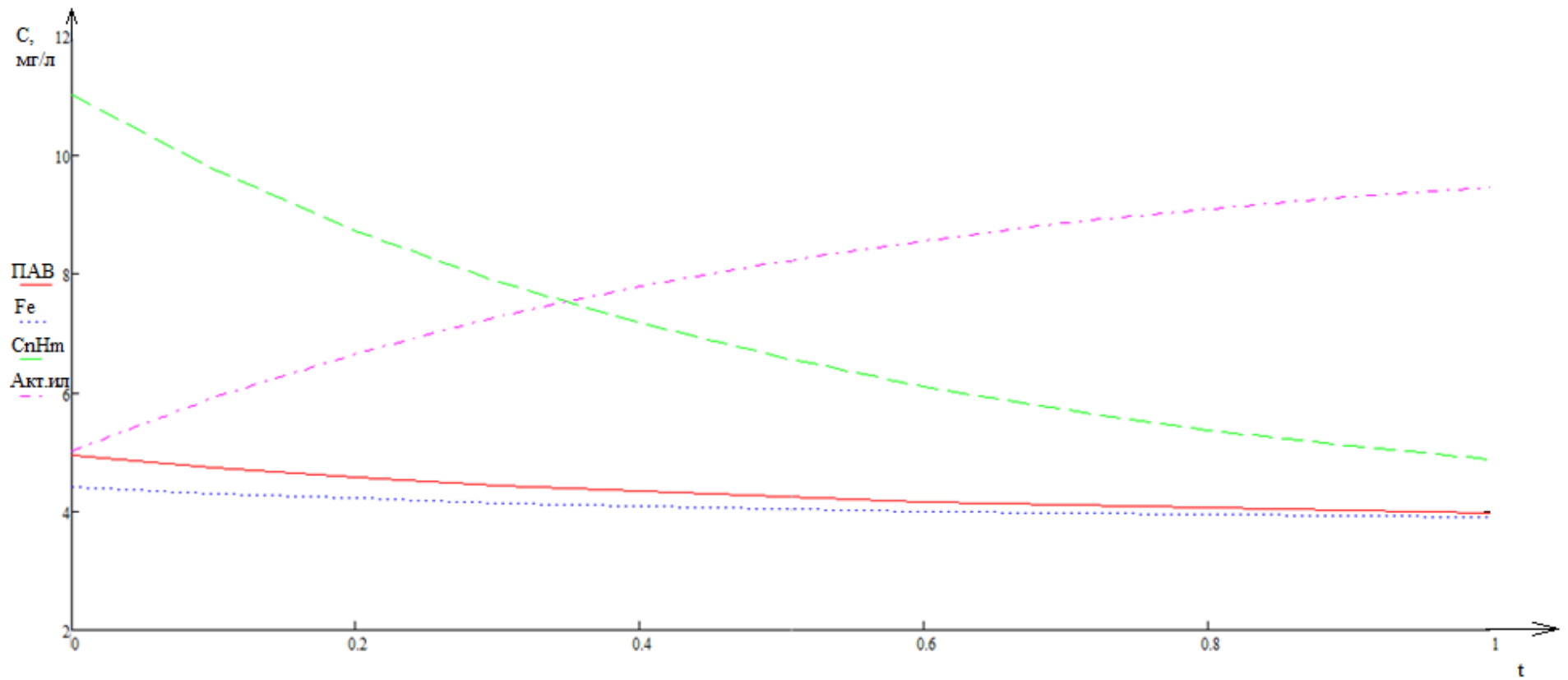


Рисунок 19 – Изменения содержания приоритетных загрязняющих веществ и концентрации биомассы

Следующим этапом был произведен подбор таких начальных значений, при которых на выходе из блока биологических очистных сооружений соблюдались бы показатели ПДК. Допустимые концентрации представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Максимальные, средние и допустимые значения концентрации приоритетных загрязняющих веществ

Показатель	$C_{\max}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$C_{\text{ср}}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$C_{\text{доп}}$ , мг/дм <sup>3</sup>
1	2	3	4
БПК <sub>полн</sub>	170	114	147
Взвешенные вещества	220	112	180
Сульфаты	139	62	106
Ион аммония	41,3	18,6	32
ПАВ	4,93	1,47	3,38
Железо общее	4,4	0,91	2,7
Нефтепродукты	11	0,5	4,4

Анализ представленной модели показал, что очищение некоторых загрязняющих веществ до допустимых значений на данных сооружениях очистки невозможно. Их концентрация на входе в аэротенк слишком высока и несет угрозу жизнедеятельности биоценоза активного ила, следовательно, и качеству очистки в целом.

Для обеспечения равномерной подачи жидкости с усредненной концентрацией загрязняющих веществ, при которой будут достигаться высокие показатели качества очистки, а активный ил будет благополучно функционировать, предлагается использовать дополнительный резервуар для разбавления стоков до подачи их на биологические очистные сооружения – усреднитель. Такое сооружение также обезопасит последующие этапы очистки в случае возникновения залповых сбросов сточных вод.

Схема предлагаемой модернизации системы показана на рисунке 20.

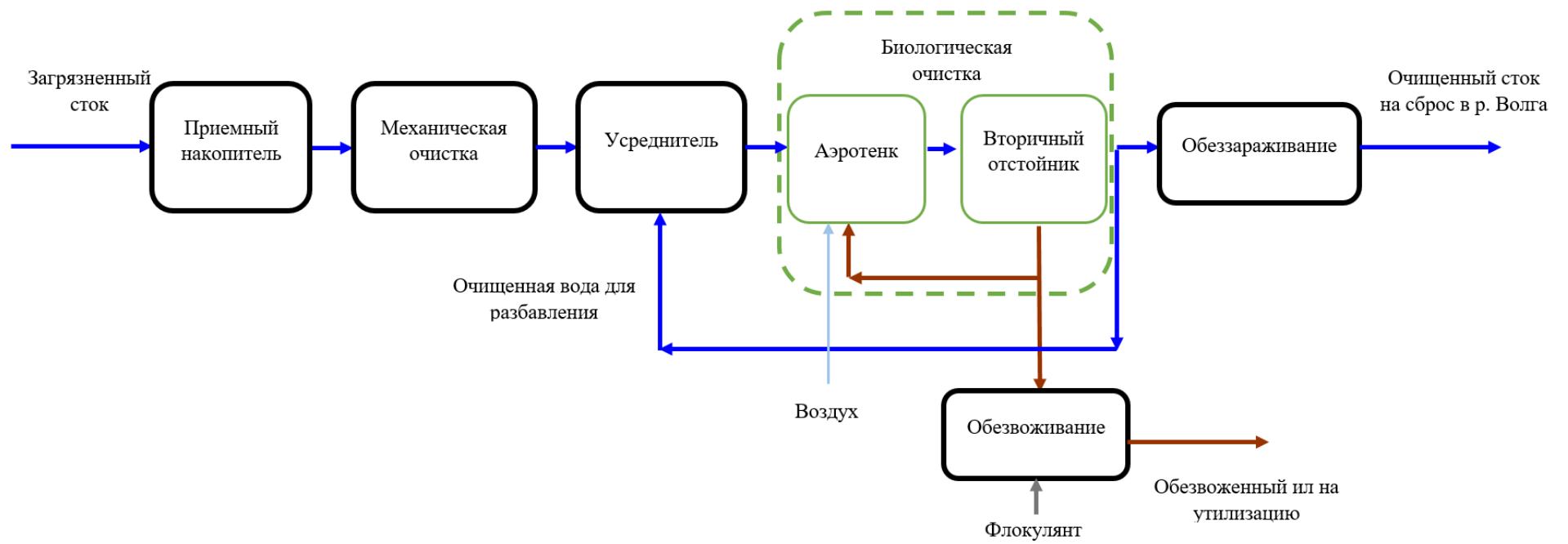


Рисунок 20 - Технологическая схема предлагаемой системы очистки на очистных сооружениях г.о. Жигулевск

Для полноценного функционирования предложенной системы необходимо рассчитать разбавление стоков в усреднителе до допустимых значений, а также оснастить сооружения на входе датчиками контроля. Датчики измеряют параметры стоков, передают информацию на пульт управления, где принимается решение о необходимости разбавления входящего стока.

### **2.3 Практическое использование математической модели при очистке сточных вод**

Использование математической модели для очистки стоков на практике подразумевает разработку алгоритма автоматизации очистной системы. Эффективные алгоритмы автоматизации призваны существенно повысить результативность данной системы.

Так, наличие датчиков, контролирующих состав сточных вод на входе в очистной комплекс предприятия, дает возможность регулировать их количество, так как резкое превышение загрязняющих веществ негативно влияет на состояние активного ила и работоспособность всей системы. Выходом из ситуации может послужить устройство дополнительного резервуара для разбавления субстанции, вследствие чего концентрация загрязняющих веществ снижается до допустимых значений. Использование дополнительных емкостей также способно выравнять колебания температурных показателей сточных вод.

Усреднение значений проводят в усреднителях двух типов – проточных или контактных. Наиболее употребительны проточные усреднители, представляющие собой длинные многоходовые резервуары с устройствами для перемешивания. Усреднители проточного типа могут быть прямоугольными (рисунок 21.1) и круглыми (рисунок 21.2). Контактные усреднители эффективны при небольших объемах стоков, в периодических процессах и для обеспечения точных показателей концентраций веществ.

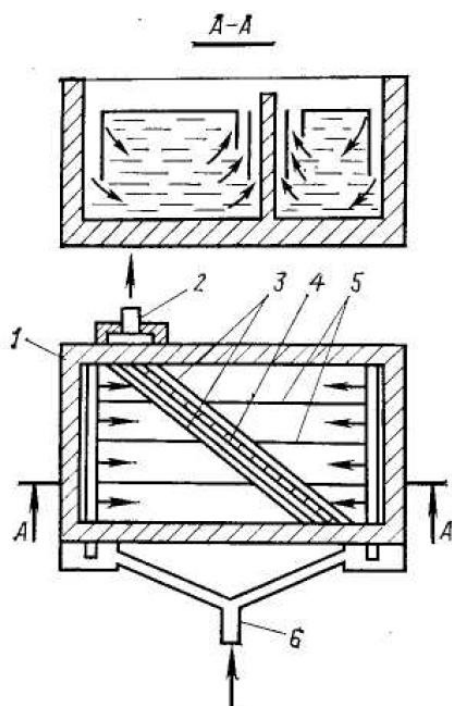


Рисунок 21.1 - Прямоугольный усреднитель сточных вод: 1 — распределительный лоток; 2 — водоотводный канал 3 — сборные лотки 4 — глухая перегородка, 5 — вертикальная перегородка, 6 — подвод воды.

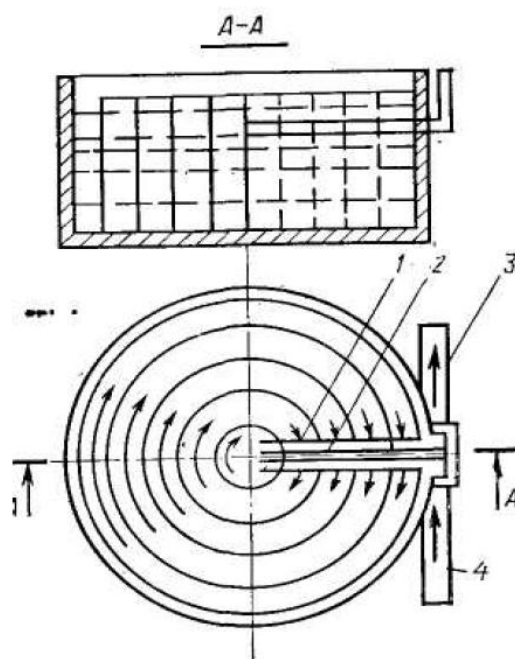


Рисунок 21.2 - Круглый усреднитель сточных вод: 1 — распределительным лоток, 2 — перегородка, 3 — сборный лоток; 4 — подвод воды.

Изменение концентрации в сточной воде может произойти в результате ее залпового сброса или вследствие циклических колебаний состава вод.

Объем усреднителя определяется исходя из расхода стоков или концентрации загрязнителей. Во втором случае определяющим критерием для расчета является коэффициент усреднения, который рассчитывается по формуле:

$$k_n = \frac{C_{max} - C_{cp}}{C_{доп} - C_{cp}} \quad (44)$$

где  $C_{max}$ ,  $C_{cp}$ ,  $C_{доп}$  — соответственно максимальная, средняя и допустимая концентрации загрязнений, г/м<sup>3</sup>.

При  $k_n \geq 5$  объем усреднителя можно рассчитать по формуле:

$$V_3 = k_n \cdot Q \cdot \tau_3 \quad (45)$$

При  $k_n \leq 5$  объем усреднителя для погашения залпового сброса определяют по формуле:

$$V_3 = \frac{1,3 \cdot Q \cdot \tau_3}{\ln \frac{k_n}{k_n - 1}} \quad (46)$$

где  $Q$  – расход воды, м<sup>3</sup>/ч;  $\tau_3$  – продолжительность залпового выброса, ч.

Исходя из полученных ранее допустимых значений концентрации загрязняющих веществ, определен необходимый объем усреднителя для погашения залповых сбросов. Значения разбавления для каждого загрязнителя, а также средний объем резервуара представлены в таблице 9:

Таблица 9 - Расчет усреднителя барботажного типа по концентрациям при расчетном расходе  $Q=673,275$  м<sup>3</sup>/час

Показатель	$C_{\max}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$C_{\text{ср}}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$C_{\text{доп}}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$t_3$ , ч	K	V, м <sup>3</sup>	$V_{\text{ср}}$ , м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
БПК <sub>полн</sub>	170	114	147	1	1,697	876,5	1027
Взвешенные вещества	220	112	180	1	1,588	785	
Сульфаты	139	62	106	1	1,750	920,5	
Ион аммония	41,3	18,6	32	1	1,690	874,1	
ПАВ	4,93	1,47	3,38	1	1,812	971,3	
Железо общее	4,4	0,91	2,7	1	1,950	1084	
Нефтепродукты	11	0,5	4,4	1	2,690	1680	

Необходимый объем усреднителя для усреднения расхода определяют по графику притока сточных вод за определенный период (сутки) с учетом требуемой степени усреднения.



Для проведения подготовительного к биологической очистке этапа, применяются разнообразные модели установок для усреднения сточных вод. В зависимости от требуемой суточной производительности, конструкции, оснащения дополнительными функциями, можно подобрать установку для любой станции биологической очистки стоков.

Например, модульный усреднитель марки АМАК (рисунок 22) представляет собой усиленную металлокаркасом прямоугольную полимерную емкость. Оборудован аэраторами для лучшего перемешивания и предварительного окисления стоков, пеносборником для удаления пены и флотошлама. Емкость полностью герметична, для отвода избыточного воздуха предусмотрен вентиляционный канал, для технического обслуживания – технологические герметичные люки.



Рисунок 22 - Модульный усреднитель марки АМАК

Для определения параметров воды входного потока широко применяются автоматические анализаторы. С их помощью можно с заданной точностью и периодичностью замерить качество воды по следующим показателям: температура, растворенный кислород, рН, мутность, БПК, ХПК, а также перечень загрязняющих веществ, таких как: нефтепродукты, хлориды, азот аммонийный/нитратный/нитритный/общий, фтор и его соединения, взвешенные вещества, медь, алюминий, никель, железо и т.д.

Автоматизированная система управления параметрами сточных вод на очистных сооружениях включает в себя контроллер для подключения датчиков и анализаторов в количестве от одного до двадцати штук в зависимости от модели (рисунок 23).



Рисунок 23 - Контроллеры разного исполнения

Контроллер системы, к которой подключаются датчики и с которого производится управление, состоит из одного дисплейного модуля и одного или нескольких модулей датчиков.

Датчики располагаются непосредственно в толще очищаемой сточной воды. В зависимости от цели анализа они могут быть расположены: в приемном резервуаре для определения параметров рН, проводимости, ХПК, нитратов, ионов аммония; в первичных отстойниках могут измерять проводимость и рН; в усреднителях, предшествующих биологической очистке измеряют такие параметры как концентрация взвешенных веществ, ионов аммония, нитратов, фосфатов, ХПК, БПК. Непосредственно на этапе биологической очистки в аэротенках и вторичных отстойниках к этим измерениям добавляются также замеры концентрации растворенного кислорода и уровня ила. Глубина погружения датчика варьируется от 5 см до 3 метров включительно. Пример исполнения датчика представлен на рисунке 24.

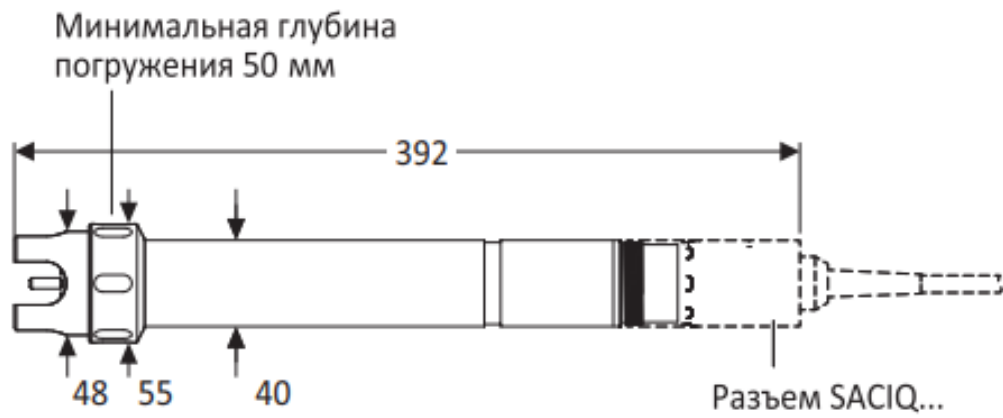


Рисунок 24 - Конструкция и габариты датчика аммонийного и нитратного азота

Вариант закрепления датчика в аэротенке представлен на рисунке 25.



Рисунок 25 - Вариант закрепления датчика в аэротенке

Вариант соединения датчика с контроллером показан на рисунке 26.

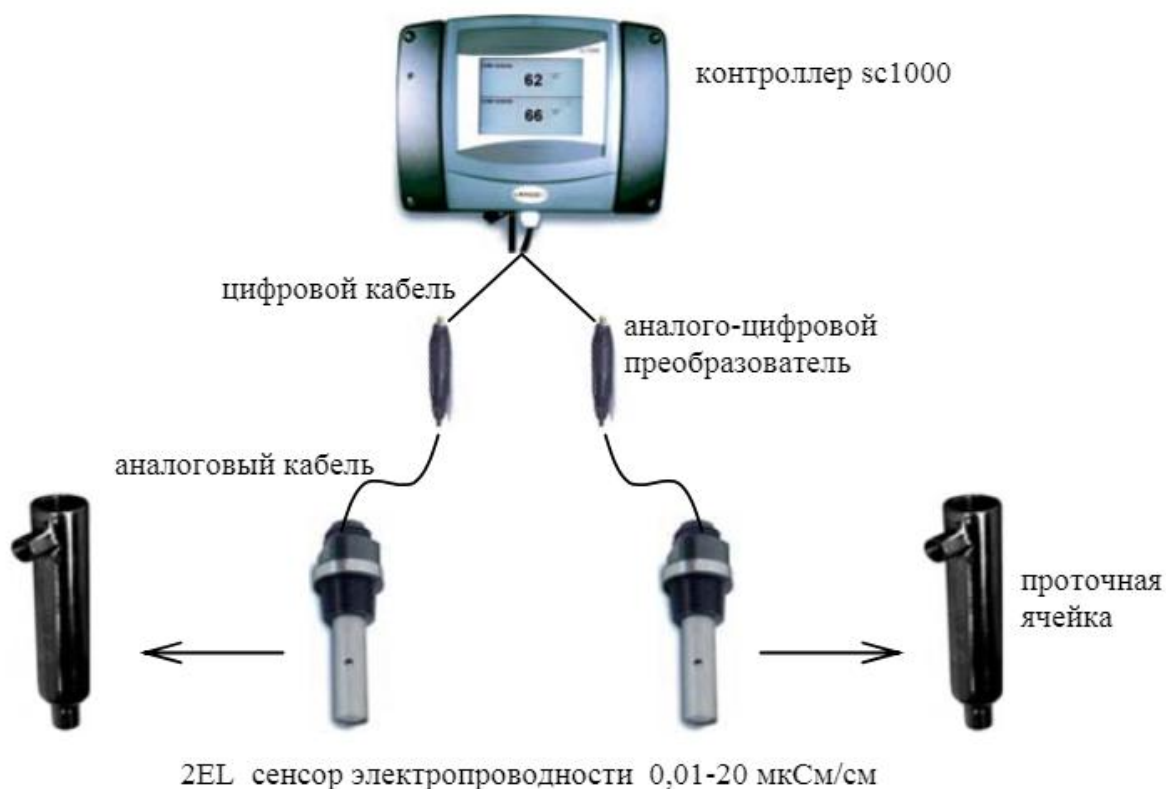


Рисунок 26 - Вариант соединения датчика с контроллером

Измеряя концентрацию заданного вещества, датчик преобразует и усиливает сигнал, подает его на контроллер, а оператор или же автоматизированная система управления принимает решение о дальнейших действиях. При превышении допустимых концентраций загрязняющих веществ, которые могут вывести биологическую систему очистки из равновесия, подача стоков в аэротенки прекращается, они направляются в усреднитель, где разбавляются до приемлемой концентрации.

## Выводы по 2 главе:

1. Математическое описание процесса биологической очистки состоит из описания гидродинамики потоков в сооружениях и описания кинетики окисления загрязняющих веществ и роста биомассы.

2. При описании гидродинамики потоков выбрана диффузионная модель для представления протекающих в аэротенке процессов, модель полного перемешивания – для вторичного отстойника.

3. Анализ гидродинамической модели показал, что оптимальными параметрами системы являются: критерий Пекле  $Pe=10$ , коэффициент рециркуляции  $R \geq 5$ , соотношение долей объемов аэротенка и отстойника 0.7:0.3.

4. Для описания кинетики окисления загрязняющих веществ и роста биомассы выбрана ячеечная модель. Проведенный по приоритетным загрязняющим веществам (БПК<sub>полн</sub>, взвешенные вещества, сульфаты, ионы аммония, ПАВ, железо общее, нефтепродукты) анализ модели выявил допустимые значения концентраций, при которых система будет стабильно обеспечивать удовлетворительные показатели очистки.

5. Исходя из найденных допустимых значений, рассчитан объем усреднителя  $V=1027 \text{ м}^3$ , установка которого позволит принимать залповые сбросы без риска для системы.

6. Для своевременного оповещения о поступающих стоках, содержащих вещества с концентрацией, превышающей допустимую, предложена установка системы датчиков состава и параметров сточной жидкости.

В данной главе предложены модели, отражающие гидродинамику потоков в системе и динамику процессов биохимического окисления. С их помощью можно поддерживать такие параметры поступающей на очистку сточной воды, которые не будут оказывать губительного воздействия на биоценоз активного ила, следовательно, не будут снижать качество очистки. Приборы контроля состава стоков могут выявлять отклонения концентраций

загрязняющих веществ в стоках от допустимых, безопасных для успешного функционирования системы, блокируя их превышения.

## Заключение

В магистерской диссертации были поставлены задачи и по результатам работы получены следующие результаты:

1. Анализ особенностей процесса биологической очистки стоков на городских очистных сооружениях выявил параметры системы, поддержание которых обеспечивает стабильно высокие показатели очистки стоков на выходе.

2. При помощи методов математического моделирования процесса биологической очистки определены оптимальные параметры системы и допустимые концентрации загрязняющих веществ во входном потоке.

3. Исходя из найденных допустимых значений, рассчитан объем усреднителя, установка которого позволит принимать залповые сбросы без риска для системы. Для своевременного оповещения о поступающих стоках, содержащих вещества с концентрацией, превышающей допустимую, предложена установка системы датчиков состава и параметров сточной жидкости.

4. Предложена система регулирования качества очистки стоков для биологического этапа при использовании методов математического моделирования. Дополнительное оснащение системы резервуаром для разбавления стоков – усреднителем, который выступает в качестве подготовительного этапа перед поступлением на биологическую очистку. Приборы контроля состава стоков могут выявлять отклонения концентраций загрязняющих веществ в стоках от допустимых, безопасных для успешного функционирования системы, не допуская критических значений.

## Список используемых источников

1. Алиева Р.М., Илялетдинова А.Н. Реализация экологического принципа в микробиологической очистке сточных вод. Изв. АН СССР. 1986, № 4.
2. Архипченко И.А. Микробиологические аспекты очистки сточных вод. Известия АН СССР, Сер. Биол. 1983, № 4.
3. Белоконь П.И., Белоконь С.И., Юсупов И.А., Титова Ю.А. Формирование, очистка и использование сточных вод. / Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана № 3, 2017.
4. Бодров В.И., Попов Н.С., Арзамасцев А.А. Определение гидродинамической структуры водных объектов в нестационарных условиях // Химия и технология воды. 1984. Т. 6. № 5.
5. Ботук Б.О. Очистка бытовых сточных вод. М.: Издательство Министерства коммунального хозяйства, 1949.
6. Вавилин В.А. Время оборота биомассы и деструкция органических веществ в системах биологической очистки. М., Наука, 1986.
7. Вавилин В.А., Васильев В.Б. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. М.: Наука, 1978.
8. Вавилин В.А., Васильев В.Б. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. М.: Наука, 1978.
9. Варваров В.В., Брындина Л.В., Ильина Н.М. Биологическая очистка сточных вод. Экология и безопасность жизнедеятельности, 1996, № 1.
10. Воронов Ю.В. Исследования по очистке сточных вод. - М.: изд. МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1975.



11. Гельфанд Е.Д. Основы биологической очистки сточных вод: лекция для студентов, обучающихся по специальностям 210400.62, 240100.62, 280200.62, 240406.01, 200402.01. А. : 2012.
12. Гилл Ф., Мюрей У., Райт М. Практическая оптимизация. — Пер. с англ.-М., 1985,509 с.
13. Гляденов С.Н. Очистка сточных вод: традиции и новации / Экология и промышленность России. – 2001. – № 2.
14. Голубовская Э.К. Биологические основы очистки воды. — М.: Высшая школа, 1978
15. Громов Б.В. Строение бактерий. Учебное пособие. Л., Изд-во ЛГУ, 1985.
16. Гроп Д. Методы идентификации системы. // - М., 1979. 302 с.
17. Гюнтер Л.И. Влияние технологических параметров работы аэротенков на формирование биоценозов и биохимические характеристики активного ила. Научн.тр. Академии коммун, хозяйства им. К.Д. Памфилова, 1976.
18. Денисов А.А. Повышение эффективности и надежности биологической очистки сточных вод. М. ВНИИТЭИАгропром, 1989.
19. Емельянов, А.Г.: Основы природопользования. - М.: Академия, 2011.
20. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.:Акварос, 2003.
21. Жмур Н.С. Управление процессом и контроль результата очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.:Луч, 1997.
22. Жуков А.И., Монгайт И.Л., Родзилфер И.Д. Методы очистки производственных сточных вод. - М.: Стройиздат, 1977.
23. Игнатов Д.В., Совершенствование технологии очистки сточных вод на примере очистных сооружений г.о. Жигулевск. 2017.
24. Итоги науки и техники. Процессы и аппараты химической технологии. Том 10, М. 1982.

25. Кагановский А.М., Кульский Л.А. и др. Очистка промышленных сточных вод. — Киев: Техника, 1974.
26. Каинума М., Харасава Х., Найто М. О выборе структуры процесса очистки сточных вод // Канке гидзюцу. 1986. Т. 15. № 10.
27. Карелин А.Я., Жуков Д.Д., Журов В.Н., Репин Б.Н. Очистка производственных сточных вод в аэротенках. М., Стройиздат, 1983.
28. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. М.: Химия, 1976.
29. Кафаров В.В. Основы массопередачи. М.: Высшая школа, 1979.
30. Кафаров В.В., Винаров А.Ю., Гордеев Л.С. Моделирование и системный анализ биохимических производств. М.: Лесная промышленность, 1985.
31. Комиссаров Ю.А., Глебов М.Б., Гордеев Л.С. и др. Химико-технологические процессы. Теория и эксперимент. М.: Химия, 1999.
32. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Нгуен Суан Нгуен. Анализ и синтез систем водообеспечения химических производств. М.: Химия, 2002.
33. Кульский Л.А. та in, Donobigi АН УССР, 1964, №10, 1973-1375.
34. Кургаев Е.Ф. Основы теории и расчета осветителей — М.: Госстройиздат, 1962.
35. Методические рекомендации по расчету количества и качества принимаемых сточных вод и загрязняющих веществ в системы канализации населенных пунктов. Утверждены приказом Госстроя России от 06.04.01 № 75. — М.: Госстрой России, 2001.
36. Найденко В.В., Кулакова А.П., Шеренков А.И. Оптимизация процессов очистки природных и сточных вод. - М.: Стройиздат, 1984.
37. Перт С. Дою. Основы культивирования микроорганизмов и клеток. / - Пер. с англ., - М., 1978.331 с.
38. Попкович Г.С. Водоснабжение и санитарная техника. 1972, № 4, 17-19.

39. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 N 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

40. Роговская Ц.И. Биохимический метод очистки производственных сточных вод. М.: Издательства литературы по строительству, 1967.

41. Синее О.П. Интенсификация биологической очистки сточных вод. - Киев: Техника, 1983.

42. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. // —М.: Наука. 1972.312 с.

43. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. — М.: Мир, 1973. 957 с.

44. Численные методы условной оптимизации. - Пер. с англ. / под ред. А. А. Петрова. -М.: Мир, 1977, 209 с.

45. Швецов В.П. Сб. «Труды института ВОДГЕО» Вып. 23. 1970, 48-55.

46. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. // - М.: Мир, 1975. 683 с.

47. Яковлев СВ. и др. Водоснабжение и санитарная техника. 1972, № 4, 8-12.

48. Яковлев СВ., Карелин Я.А., Ласков Ю.М., Калицун В.И. Водоотведение и очистка сточных вод. — М.: Стройиздат, 1996.

49. D. Borowski, W. Huddleston, B. Thorp. SchussenAktivplus: reduction of micropollutants and of potentially pathogenic bacteria for further water quality improvement of the river Schussen, a tributary of Lake Constance, Germany / Borowski D., Huddleston W., Thorp B. // International Journal of Energy and Environmental Engineering. December 2014, Volume 5, Issue 4, pp 387–397

50. D. Smith, M. Howdeshel. Wastewater treatment system and method / Smith D., Howdeshel M. // Mol Cell Toxicol 8:209–216.

51. E. Butler. Oxidation pond for municipal wastewater treatment / Butler E. // *Applied Water Science*, March 2017, Volume 7, Issue 1, pp 31–51.
52. G. Hatcher, W. Ijomah and J. Windmill. Design for remanufacturing in China: a case study of electrical and electronic equipment / Hatcher G., Ijomah W. and Windmill J. // *Journal of Remanufacturing* ISSN: 2210-464X 2210-4690.
53. Greenstreet R.L., Connor R.J. Power of Tests for Equality of Covariance Matrices. // *Technometrics*, - 1974, v.16, No 1, p. 27-30.
54. H. Sadegh. The role of nanomaterials as effective adsorbents and their applications in wastewater treatment / Sadegh H. // *Journal of Nanostructure in Chemistr*, March 2017, Volume 7, Issue 1, pp 1–14.
55. I. Okoh. Triclosan in water, implications for human and environmental health / Okoh I. // *Environ Health Perspect* 116:1203–1210.
56. J. Hoinkis. Optimal design of an activated sludge plant: theoretical analysis / Hoinkis J. // *Applied Water Scienc*, June 2013, Volume 3, Issue 2, pp 375–386.
57. J. Sibony, G. Desbos. Process and installation for biological treatment, e.g. by nitrification and/or denitrification, of an effluent including nitrated pollution / Sibony J., Desbos G. // *J Environ Manag* 95: S71–S76.
58. Jyri Maunuksela, Gwenda McIntyre. Method to solve the swelling sludge problem in waste treatment plants by controlling mycelium bacteria: <https://www.google.ru/patents>
59. Mei Liu, Elizabeth Summer, Sarah Duggleby. Control of filamentous bacteria induced foaming in wastewater systems: <https://www.google.ru/patents>
60. Michael Knobloch, Andreas Schmidt, Reinhard Koch, Volkmar Peukert. Plant for biochemically treating wastewater: <https://www.google.ru/patents>
61. Nagao H. On some test Criteria for Covariate Matrix. // *Aun. Stat.* - 1973, v.1, No 4, p. 700-900.
62. Rita Tribskorn, Klaus Amler, Ludek Blaha. SchussenAktivplus: reduction of micropollutants and of potentially pathogenic bacteria for further

water quality improvement of the river Schussen, a tributary of Lake Constance, Germany: <http://enveurope.springeropen.com/>

63. S. Jafarinejad. Cost estimation and economical evaluation of three configurations of activated sludge process for a wastewater treatment plant (WWTP) using simulation / Jafarinejad S. // *Applied Water Science*, pp 1–9.

64. V. Chaturvedi, P. Verma. Microbial fuel cell: a green approach for the utilization of waste for the generation of bioelectricity / Chaturvedi V., Verma P.// *Bioresources and Bioprocessing* 2016.

65. Wanner J. Microbial population dynamics in biological waste water treatment plants // In: *Microbial Community analysis* / Eds.: T.E. Cloete and N.O. Muyima. — 1997. — P. 35-59.