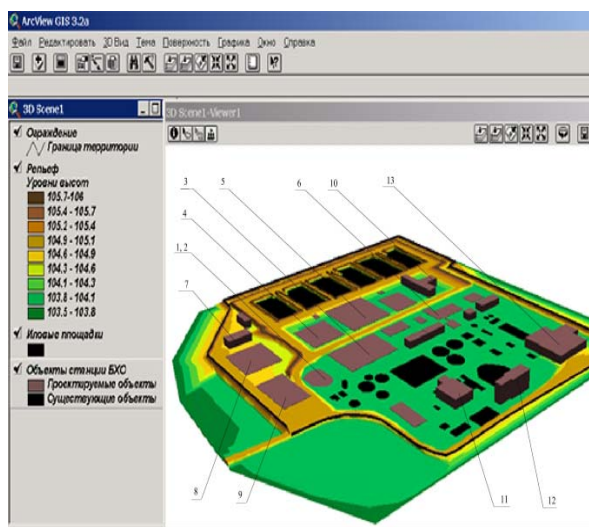


Е.Н. Малыгин, Н.С. Попов,
В.А. Немтинов, С.Я. Егоров, В.Г. Однолько

ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАНЦИЙ БИОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ



Издательство ТГТУ

Министерство образования Российской Федерации
Тамбовский государственный технический университет

Е.Н. Малыгин, Н.С. Попов,
В.А. Немтинов, С.Я. Егоров, В.Г. Однолько

**ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ
И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАНЦИЙ
БИОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ**

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по специальности
071900 – «Информационные системы и технологии»*

Тамбов
Издательство ТГТУ
2004

УДК 54.058(075)
ББК Н76я73
И741

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор,
председатель комитета по науке и инновационной политике
Администрации Тамбовской области

В.Г. Матвейкин

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой компьютерного и математического
моделирования ИМФИ ТГУ им. Г.Р. Державина

А.А. Арзамасцев

Доктор технических наук, профессор кафедры САПР ТГТУ

**Малыгин Е.Н., Попов Н.С., Немтинов В.А., Егоров С.Я.,
Однолько В.Г.**

И741 Информационный анализ и автоматизированное проектирование станций биохимической очистки: Учебное пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. 120 с.

В учебном пособии на примере решения задачи проектирования станций биохимической очистки сточных вод показаны подходы к автоматизации выполнения проектных работ, разработке имитационных моделей информационных процессов, математических методов моделирования информационных процессов и систем, планирования имитационных экспериментов с моделями; формализации и алгоритмизации информационных процессов, статистического моделирования на ПЭВМ, оценки точности и достоверности результатов моделирования и др.

Данное пособие предназначено для студентов специальности 071900 «Информационные системы и технологии» в соответствии с государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования (направление подготовки дипломированного специалиста 654700 – «Информационные системы») и может быть использовано в качестве дополнительного материала при изучении следующих дисциплин: «Моделирование систем», «Проектирование информационных систем», «Представление знаний в информационных системах» и др. Оно также будет полезно студентам специальностей 170500 – «Машины и аппараты химических производств и предприятий строительных материалов» и 330200 – «Инженерная защита окружающей среды» при изучении дисциплины «Оборудование промышленной экологии»; учащимся магистратуры по программе 551819 – «Информационные системы технологических машин».

УДК 54.058(075)

ББК Н76я73

ISBN 5-8265-0272-X

- © Малыгин Е.Н., Попов Н.С., Немтинов В.А., Егоров С.Я., Однолько В.Г., 2004
- © Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ), 2004

Учебное издание

**Малыгин Евгений Николаевич,
Попов Николай Сергеевич,
Немтинов Владимир Алексеевич,
Егоров Сергей Яковлевич,
Однолько Валерий Григорьевич**

**ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ
И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАНЦИЙ
БИОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ**

Учебное пособие

Редактор Т.М. Глинкина

Компьютерное макетирование Е.В. Кораблевой

Подписано в печать 05.03.04

Формат 60 × 84 / 16. Бумага офсетная. Печать офсетная

Гарнитура Times New Roman. Объем: 6,87 усл. печ. л.; 6,8 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 187

Издательско-полиграфический центр

Тамбовского государственного технического университета,
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

В России охране окружающей среды всегда уделялось большое внимание. В настоящее время принято много законодательных актов, направленных на сохранение, рациональное использование, расширенное воспроизводство и развитие природных ресурсов, федеральные законы «Об охране окружающей среды» [67], «Об охране атмосферного воздуха» [68], «О животном мире» [69] и др. Контроль за соблюдением требований законодательств осуществляется Министерством природных ресурсов РФ.

Основными антропогенными объектами, функционирование которых во многих случаях приводит к нарушению состояния равновесия природной среды, являются промышленные предприятия. Под промышленным предприятием подразумевается планомерно формируемая совокупность взаимосвязанных объектов, которые созданы для совместного решения одной или нескольких народнохозяйственных проблем, сконцентрированы на ограниченной территории, обеспечивают не только эффективное (с позиций народного хозяйства страны) использование местных и полученных извне ресурсов, но и охрану окружающей среды.

Во многом степень загрязнения природной среды зависит от технологии получения готовой продукции. Так, например, в настоящее время большинство химических процессов ведется в водных растворах, которые потом идут в стоки, в то время как известны и процессы химии твердого тела, не нуждающиеся в применении воды и растворителей. Допущенные просчеты при выборе технологии и в оценке степени загрязнения окружающей среды при бурном развитии химических производств привели к загрязнению водоемов, кислотным дождям, гибели отдельных видов растений и животных, угрозе здоровью людей и т.п. По мнению академика Н.С. Ениколопова, при действующем критерии экономической проекции, требующем снижения капитальных и текущих затрат на создание любого производства, часто жертвуют всем «лишним» и в первую очередь «отягощающими» проект системами очистки отходов.

Основным средством исследования взаимодействия производственных технологических систем (ПТС) с природной и социальной средой является математическое моделирование. Оно позволяет выявить возможные изменения физических, химических и биологических состояний окружающей среды, вызванные деятельностью ПТС. Другими словами, с помощью математических моделей можно оценить «экологичность» ПТС через изменение параметров природной среды.

Степень экологической опасности ПТС, по предложению академика Б.Н. Ласкорина, необходимо оценивать по количеству и составу образующих отходов [31]. На основании знаний о количественном и качественном составе отходов можно прогнозировать ущерб, наносимый природе и обществу, и в зависимости от его величины принимать решения по выбору технологических процессов ПТС [24]. При реализации такого подхода возникают серьезные трудности, связанные со сложностью разработки моделей переноса и диффузии примесей в атмосферном воздухе, воде, почве с учетом их физических и биохимических превращений, состоянием сред и т.п., а также отсутствием точных методов расчета всех видов ущерба, наносимого природе и обществу в стоимостном выражении. В процессах, возникающих вследствие воздействия ПТС на окружающую среду, исходя из их специфики и пространственно-временных масштабов, можно условно выделить три уровня изменений:

- физико-химические превращения, происходящие в атмосфере, гидросфере и литосфере;
- биологические реакции, происходящие в живых организмах;
- социально-экономические последствия.

Одним из важных компонентов окружающей среды является водная среда. Проблема охраны водных ресурсов в рамках проектирования ПТС традиционно рассматривается в комплексе с решением проблемы водообеспечения промышленности и городов. После того, как вода проходит через технологические процессы на предприятиях или используется в хозяйственно-бытовых целях, она теряет свое качество и отрицательно влияет на санитарное состояние природных водоемов – приемников сточных вод. Прогнозирование качества воды в водоемах, осуществляемое для всех нормируемых показателей по математическим моделям, позволяет определить необходимую степень очистки сточных вод [17]. В общем виде состояние водной среды можно представить в виде следующей функциональной зависимо-

сти:

$$c = f(c_0, m, p, l, g, r),$$

где c_0 , c – соответственно состояние водной среды до и после загрязнения; m – метеоусловия, влияющие на режим смешения, биологические процессы и т.п.; p – множество типов примесей, поступающих в водную среду; l – гидрологические факторы; g – геометрия природного водоема (глубина, площадь поверхности, форма и т.п.); r – биологические и биохимические реакции, происходящие в водоеме.

При размещении, технико-экономическом обосновании проекта и проектировании ПТС, оказывающих прямое либо косвенное влияние на состояние окружающей природной среды, должны выполняться требования экологической безопасности и охраны здоровья населения, предусматриваться мероприятия по охране природы, рациональному использованию и воспроизводству природных ресурсов, оздоровлению окружающей природной среды. Запрещается ввод в эксплуатацию объектов, не обеспеченных современными экологически чистыми технологиями, сооружениями и установками по очистке, обезвреживанию и утилизации вредных отходов, выбросов и сбросов до уровня предельно допустимых нормативов, средствами контроля за загрязнением окружающей природной среды, без завершения за проектированных работ по охране природы и оздоровлению окружающей природной среды.

Выполнение этих требований во многом зависит от решения задач расчета аппаратурного оформления всех основных и вспомогательных процессов проектируемых производств, в том числе и процессов утилизации отходов.

Окончательный вариант технологических процессов по переработке газообразных, жидких и твердых отходов принимается после детального рассмотрения каждого варианта из множества допустимых, решения для него задачи расчета оборудования, оптимизации технологических параметров и выбора наилучшего в зависимости от принятого критерия оптимальности.

1 ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И МЕТОДЫ ОЧИСТКИ

СТОЧНЫХ ВОД ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Под **качеством воды** в целом понимается характеристика ее состава и свойств, определяющая ее пригодность для конкретных видов водопользования (ГОСТ 17.1.1.01–77), при этом критерии качества представляют собой признаки, по которым производится оценка качества воды.

Предельно допустимая концентрация в воде водоема хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК_в) – это максимальная концентрация вредного вещества в воде, которая не должна оказывать прямого или косвенного влияния на организм человека в течение всей его жизни и на здоровье последующих поколений, и не должна ухудшать гигиенические условия водопользования.

Предельно допустимая концентрация в воде водоема, используемого для рыбохозяйственных целей (ПДК_{вр}) – это максимальная концентрация вредного вещества в воде, которая не должна оказывать вредного влияния на популяции рыб, в первую очередь промысловых.

Нормирование качества воды состоит в установлении для водного объекта совокупности допустимых значений показателей состава и свойств воды, в пределах которых надежно обеспечиваются здоровье населения, благоприятные условия водопользования и экологическое благополучие водного объекта.

Правила охраны поверхностных вод устанавливают нормы качества воды водоемов и водотоков для

условий хозяйственно-питьевого, культурно-бытового и рыбохозяйственного водопользования. Вещество, вызывающее нарушение норм качества воды, называют **загрязняющим**.

Ряд показателей позволяет судить об общей загрязненности воды и степени загрязнения биологически окисляемыми веществами. К ним относятся: органолептические (цвет, вкус, запах, прозрачность, мутность); плотность; pH; температура; электропроводность; щелочность; кислотность; жесткость; содержание солей, общего азота, взвешенных веществ и т.д. Оценку эффективности работы очистных сооружений проводят по следующим показателям: ХПК, БПК, pH, температура и др.

Окисляемость перманганатная и бихроматная. Величина, характеризующая содержание в воде органических и минеральных веществ, окисляемых одним из сильных химических окислителей при определенных условиях, называется окисляемостью. Существует несколько видов окисляемости воды: перманганатная, бихроматная, иодатная, цериевая. Наиболее высокая степень окисления достигается методами бихроматной и иодатной окисляемости воды. Показатель окисляемости веществ химическим способом называется химическим потреблением кислорода (ХПК). ХПК выражается в миллиграммах кислорода, расходуемого на окисление органических веществ, содержащихся в 1 дм³ воды.

Перманганатная окисляемость – это количество кислорода, эквивалентное количеству расходуемого перманганата калия. Методика определения показателя основана на окислении веществ, присутствующих в сточной воде, 0,01 %-ным раствором перманганата калия в сернокислой среде (мг O₂/л H₂O).

Методика определения ХПК основана на окислении веществ, присутствующих в сточных водах, 0,25 %-ным раствором бихромата калия (K₂Cr₂O₇) при кипячении в течение 2 часов в 50 %-ном растворе (по объему) H₂SO₄ (мг/л).

В водоемах и водотоках, подверженных сильному воздействию хозяйственной деятельности человека, изменение окисляемости выступает как характеристика, отражающая общее качество сточных вод. Для природных малозагрязненных вод рекомендовано определять перманганатную окисляемость; в более загрязненных водах определяют, как правило, бихроматную окисляемость. В соответствии с требованиями к составу и свойствам воды водоемов у пунктов питьевого водопользования величина ХПК не должна превышать 15 мг O₂/дм³; в зонах рекреации в водных объектах допускается величина ХПК до 30 мг O₂/дм³.

Биохимическое потребление кислорода (БПК). Степень загрязнения воды биоразлагаемыми органическими соединениями определяют как количество кислорода, необходимое для их окисления микроорганизмами в аэробных условиях. Биохимическое окисление различных веществ происходит с различной скоростью. К легкоокисляющимся («биологически мягким») веществам относят формальдегид, низшие алифатические спирты, фенол, фурфурол и др. Среднее положение занимают крезолы, нафтолы, ксиленолы, резорцин, пирокатехин и др. Медленно разрушаются «биологически жесткие» вещества, такие как гидрохинон, сульфенол и др.

Полная биологическая потребность в кислороде БПК_п для внутренних водоемов рыбохозяйственного назначения при 20 °С не должна превышать 3 мг O₂/дм³. В противном случае рыба задыхается из-за отсутствия кислорода, растворенного в воде.

В лабораторных условиях наряду с БПК_п определяется БПК₅ – биохимическая потребность в кислороде за 5 суток. Определение БПК₅ в поверхностных водах используется с целью оценки содержания биохимически окисляемых органических веществ и в качестве интегрального показателя загрязненности воды.

Вопросам математического моделирования и проектирования процессов по очистке сточных вод ПТС в настоящее время уделяется много внимания. В зависимости от качественного состава сточных вод получили развитие различные методы очистки. Чаще всего они используются в комплексе: каждая

стадия очистки ответственна за определенный тип примесей.

Для удаления взвешенных примесей из сточных вод используют процессы **гидромеханического отстаивания, фильтрования, флотации** и др.

Как правило, **механическая очистка** является предварительным, реже – окончательным этапом для очистки производственных сточных вод. Она обеспечивает выделение взвешенных веществ из этих вод до 90 – 95 % и снижение органических загрязнений (по показателю БПК_п) до 20 – 25 %.

Выбор метода очистки сточных вод от взвешенных частиц осуществляется с учетом кинетики процесса. Размеры взвешенных частиц, содержащихся в производственных сточных водах, могут колебаться в очень широких пределах (возможные диаметры частиц составляют от $5 \cdot 10^{-9}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ м), для частиц размером до 10 мкм конечная скорость осаждения составляет менее 10^{-2} см/с. Если частицы достаточно велики (диаметром более 30 – 50 мкм), то в соответствии с законом Стокса они могут легко выделяться отстаиванием (при большой концентрации) или процеживанием, например через микрофильтры (при малой концентрации). Коллоидные частицы (диаметром 0,1 – 1 мкм) могут быть удалены фильтрованием, однако из-за ограниченной емкости фильтрующего слоя более подходящим методом при концентрации взвешенных частиц более 50 мг/л является ортокинетическая коагуляция с последующим осаждением или осветлением во взвешенном слое.

Физико-химические методы очистки сточных вод (сорбция, флотация и др.) предназначены для удаления мельчайших (твердых и жидких) взвешенных частиц, растворенных газов, в том числе органических соединений, не подлежащих биохимическому окислению. Так, сорбционная очистка может применяться самостоятельно и совместно с биологической очисткой как метод предварительной и глубокой очистки. Преимуществами этого метода являются возможность адсорбции веществ многокомпонентных смесей и, кроме того, высокая эффективность очистки, особенно слабо концентрированных сточных вод.

Флотация используется для очистки сточных вод, содержащих поверхностно-активные вещества (ПАВ), нефтепродукты, масла, волокнистые материалы.

Химические методы (нейтрализация, окисление, восстановление и др.) способствуют очищению производственных стоков от растворенных и взвешенных частиц, а также используются как предварительная мера перед биологической очисткой или после нее для доочистки сточных вод.

Биохимические методы применяются для обезвреживания как промышленных, так и хозяйственно-бытовых сточных вод от многих растворенных органических и некоторых неорганических соединений. Процесс очистки основан на способности микроорганизмов использовать эти соединения для своего питания. При аэробной очистке колонии микроорганизмов в хлопьях активного ила или в виде биопленки функционируют в естественных условиях (биологические пруды, поля фильтрации, поля орошения), а также в искусственных сооружениях (аэротенках, биофильтрах и др.).

Для обезвреживания минерализованных стоков применяют термические методы, позволяющие выделить из них соли с получением условно чистой воды, пригодной для оборотного водоснабжения. На рис. 1.1 показана схема переработки и обезвреживания сточных вод, содержащих органические соединения.

В данной работе ограничимся перспективным и наиболее экономичным биохимическим способом обработки сточных вод [2]. Данный способ очистки является характерным для очень многих производств, включая химические.

При проектировании очистных сооружений должны решаться задачи:

- максимально возможного изъятия загрязняющих веществ в очищаемых сточных водах;
- нахождения аппаратного решения и технологического режима очистки сточных вод, позволяющего минимизировать уровень отрицательного воздействия ПТС на окружающую среду;
- обеспечения барьерной функции биохимических сооружений – предотвращения попадания концентрированных жидких отходов ПТС в водоемы – приемники очищенных сточных вод.

При выборе варианта технологической схемы биохимической очистки необходимо учитывать следующее:

1 Технологический процесс стабильной биохимической очистки можно обеспечить только в том случае, если на их вход подается поток сточных вод, характеризуемый относительно стабильным расходом и концентрациями вредных веществ. Поскольку от химических производств на очистные сооружения очень часто поступают сточные воды переменного состава и расхода, при проектировании сооружений необходимо предусматривать усреднительные аппараты.

2 При выборе технологической схемы очистных сооружений должно учитываться требование к качеству очищенных сточных вод. То есть экономическому анализу должны подвергаться технологические схемы, обеспечивающие получение очищенных сточных вод не хуже заданного качества.

3 Окончательный вариант технологической схемы станции биохимической очистки может выбираться из условия минимизации критерия приведенных затрат и выполнения ограничений технико-экономического и экологического характера.

В настоящее время проектирование систем очистки сточных вод основано на результатах большого отечественного и зарубежного опыта [2, 8, 20, 46 и др.]. Согласно СНиП 2.04–85 [46] выбор технологической схемы очистки осуществляется на основе технико-

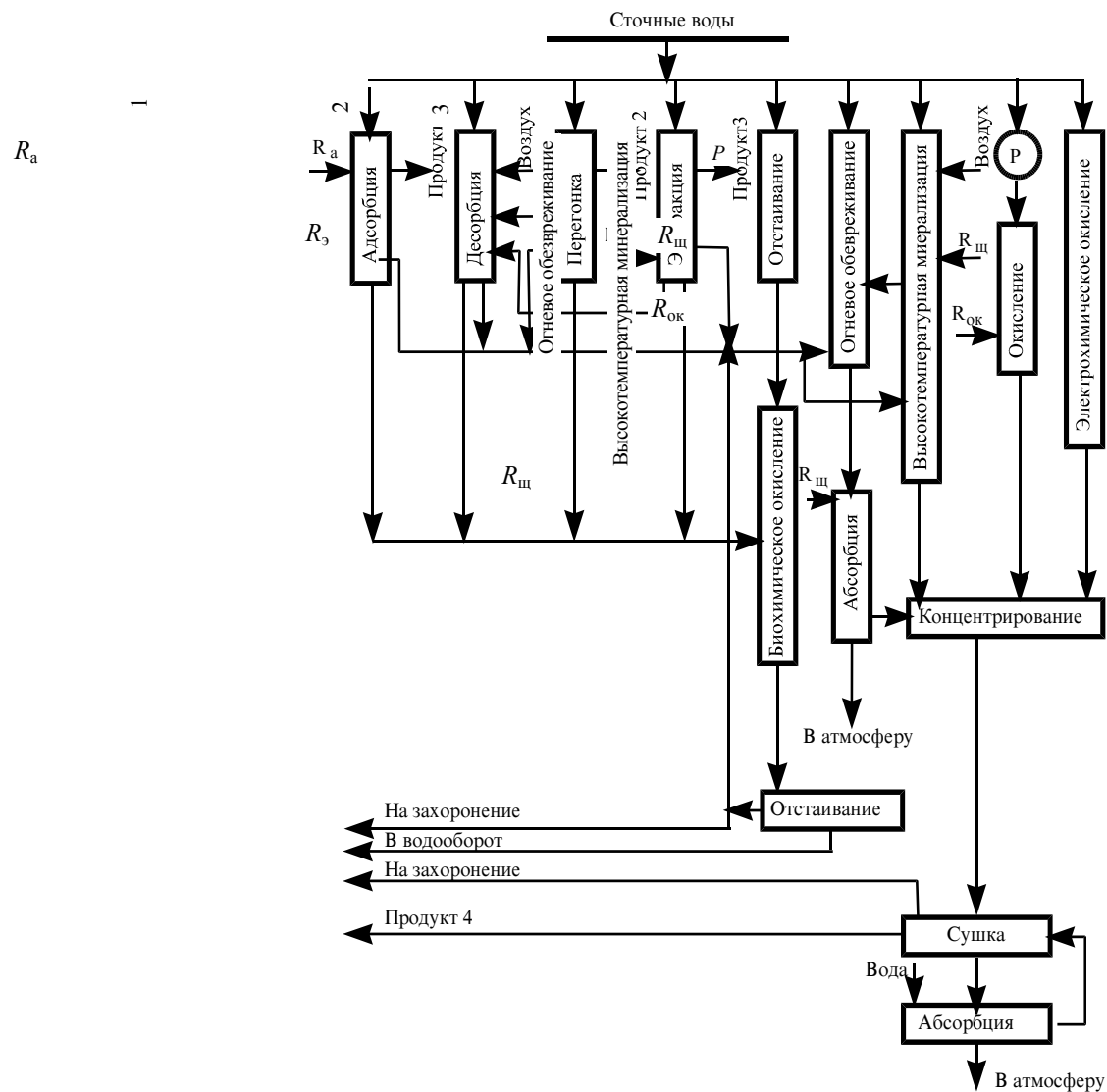


Рис. 1.1 Схема переработки и обезвреживания сточных вод, содержащих органические соединения:

R_a – адсорбент; R_3 – экстрагент; $R_{ок}$ – окислители; $R_{щ}$ – реагент щелочи; P – радиационное окисление; продукты 1...4 – полезные компоненты, извлеченные из сточной воды

экономического сравнения по приведенной стоимости на строительство и эксплуатацию сооружений. Расчет конструктивных размеров отдельных сооружений и технологических параметров при этом производится по критериям оптимальности: максимального эффекта очистки либо минимального объема сооружений. Существенным недостатком подхода, описанного в СНиП, является то, что он ориентирован на традиционный подход к расчету, использующий справочную литературу, диаграммы, таблицы и т.д., что затрудняет его применение в компьютеризированном учебном процессе. В связи с этим при сравнении альтернативных вариантов аппаратурного оформления очистных сооружений по технико-экономическим показателям ограничиваются всего лишь несколькими вариантами из достаточно большого множества допустимых. При решении задачи размещения объектов очистных сооружений на генплане проектировщики затрудняются с расчетами вариантов привязки станций БХО на местности из-за отсутствия соответствующих программных комплексов.

В современных условиях развития производств решение задачи оптимального проектирования станций очистки сточных вод приобретает особую важность. Большую сложность представляет проектирование очистных сооружений для химических предприятий, характеризующихся многоассортиментными малотоннажными производствами (производства химических красителей и полупродуктов, фармацевтических препаратов, кино- и фотоматериалов и др.). К распространенным видам жидких отходов данного класса производств относятся сточные воды, у которых постоянно меняются: расход, концентрации БПК, ХПК, органических соединений и т.д.

Существует достаточно обширный список публикаций, в которых авторы предлагают использовать при решении задачи проектирования станции биохимической очистки (БХО) математические модели, описывающие процессы биохимических превращений. Сотрудниками ВНИИ ВОДГЕО, МИСИ, ГИСИ, ИВП АН РФ, а также учеными зарубежных стран выполнен большой объем научно-исследовательских работ по созданию математических моделей и подходов к оптимизации аппаратов и сооружений станции БХО. Анализ этих работ позволяет сделать вывод о том, что очистные сооружения необходимо рассматривать как сложную техническую систему, состоящую из значительного числа технологических процессов и стадий. Однако применение методов математического программирования позволяет значительно повысить качество проектного решения.

В настоящее время при проектировании станций БХО степень необходимой очистки сточных вод находят по ряду показателей: количеству взвешенных веществ, потреблению растворенного кислорода, допустимой концентрации БПК смеси речных и сточных вод (при сбросе очищенных сточных вод в реки), ПДК водных примесей. Так как природные водоемы в большинстве случаев являются приемниками очищенных сточных вод, то при расчете данных показателей руководствуются «Правилами охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами» [20]. При прогнозировании качества воды в водном объекте должны быть учтены следующие требования в математической модели этого объекта:

- обеспечена необходимая разрешающая способность модели во времени и пространстве;
- точность прогноза, соответствующая поставленным целям;
- полнота описания качества воды с точки зрения предъявляемых к этому объекту требований;
- способность использовать начальные данные и повышать точность прогноза при наличии новой информации об объекте и процессах, происходящих в нем.

Сложность построения математической модели водного объекта определяется многочисленностью биологических видов в водной системе, пространственной неоднородностью водных объектов и др. [35]. Согласно классификации, предложенной в работе [35], различают следующие основные типы моделей, основанных на уравнении диффузии: 1) «одностадийные» и «многостадийные» модели «полного» смешения; 2) модели «идеального» вытеснения; 3) модели «дисперсионного» типа, учитывающие явления диффузии; 4) модели «конечно-разностного» типа.

В заключении отметим общие недостатки, имеющие место при проектировании производств по утилизации отходов ПТС:

- в большинстве случаев решение природоохранных задач базируется на упрощенных математических моделях, которые не способны приводить к выполнению требований по охране окружающей среды в случае их реализации;
- известные методики решения задач промышленной экологии ориентированы на традиционные

подходы к расчетам, не использующие справочную литературу, диаграммы, таблицы и т.д. в электронном варианте, что затрудняет их применение в современном учебном процессе;

– при решении задачи проектирования станции БХО очень часто не проводится исследование природного водоема – приемника очищенных сточных вод;

– отсутствуют расчеты систем управления, способных компенсировать возмущения, ведущие к «срыву» процесса очистки сточных вод.

В данной работе предлагается один из подходов решения задачи проектирования сооружения биохимической очистки сточных вод, позволяющий устранить некоторые из перечисленных недостатков. При этом уровень формализации отдельных задач определяется наличием сведений о кинетике протекания процессов обезвреживания вредных ингредиентов в отдельных аппаратах и сооружениях, а также процессов самоочищения воды в природном водоеме (реке) – приемнике очищенных сточных вод. Алгоритмы решения взаимосвязанных задач проектирования станции обеспечивают нахождение решения с точностью, определяемой точностью исходной информации.

Вопросы для самопроверки

- 1 По каким основным показателям оценивается качество воды?
- 2 Какое предельно допустимое значение ХПК воды водоемов у пунктов питьевого водопользования?
- 3 Какое предельно допустимое значение БПК_п воды внутренних водоемов рыбохозяйственного назначения?
- 4 Какие процессы используются для удаления взвешенных примесей из сточных вод? Какие методы?
- 5 Для очистки каких вод используется флотация?
- 6 Какие сточные воды могут быть очищены с помощью биохимических методов?
- 7 Что нужно учитывать при выборе варианта технологической схемы биохимической очистки сточных вод?

2 АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАНЦИЙ БИОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

2.1 Постановка задачи автоматизированного расчета станций биохимической очистки сточных вод

В общем виде задачу автоматизированного проектирования системы очистки сточных вод можно сформулировать следующим образом. Для каждой стадии выбранной схемы очистки необходимо найти: тип, геометрические характеристики и количество каждого вида оборудования, осуществляющего процесс очистки сточных вод от примесей, а также оптимальный вариант размещения данного оборудования на местности при соблюдении ограничений на выходные параметры (концентрации примесей в очищенных водах и др.) по критерию минимума приведенных затрат с учетом ущерба от загрязнения окружающей среды.

В формализованном виде постановка задачи заключается в поиске минимума целевой функции [22]

$$I_{\text{opt}} = \min_{w \in W} (F^w + U^w) \quad (2.1)$$

при выполнении санитарно-экологических ограничений:

$$P_r \{c_{wj} < (c_j^{\text{lim}} - \Delta c_{wj})\} \geq \delta_{C_j}, \quad j = \overline{1, J}; \quad (2.2)$$

$$P_r \left\{ \sum_{j=1}^{J_\theta} \frac{c_{wj}'}{c_j^{\text{lim}}} < 1 \right\} \geq 1 - \alpha, \quad \theta = \overline{1, \Theta}, \quad (2.3)$$

уравнений связи, представляющих математические модели:

– формирования вариантов структурных схем технологических процессов очистки

$$\overline{M}_1(\overline{C}_{\text{вх}}, \overline{C}_{\text{фон}}, \overline{C}_{\text{вых}}, \overline{q}, \overline{Q}, T) = 0, \quad (2.4)$$

– формирования вариантов аппаратного оформления технологической схемы очистки

$$\overline{M}_2(\overline{C}_{\text{вх}}, \overline{C}_{\text{фон}}, \overline{C}_{\text{вых}}, \overline{Q}, t_{\text{opt}}, R) = 0, \quad (2.5)$$

– формирования вариантов размещения сооружений очистной станции на генплане промышленной площадки

$$\overline{M}_3(r_{\text{opt}}, \Omega) = 0, \quad (2.6)$$

– технологических процессов механической, биохимической очистки сточных вод и обработки осадка

$$\overline{M}_4(\overline{C}_{\text{вх}}, \overline{C}_{\text{фон}}, \overline{C}_{\text{вых}}, \overline{Q}, r_{\text{opt}}) = 0, \quad (2.7)$$

– процессов естественного самоочищения воды в природном водоеме (реке) – приемнике очищенных сточных вод

$$\overline{M}_5(\overline{C}_{\text{вых}}, \overline{C}_{\text{фон}}, \overline{Q}, \Psi) = 0, \quad (2.8)$$

где W – множество возможных вариантов синтеза сооружений биохимической очистки сточных вод, $W = T \times R \times G$; T – множество возможных вариантов структуры технологической схемы процессов очистки сточных вод; R – множество возможных вариантов аппаратного оформления технологической схемы очистки; G – множество возможных вариантов размещения сооружений очистной станции на генплане промышленной площадки; $w_{\text{opt}} = \{t_{\text{opt}}; r_{\text{opt}}; g_{\text{opt}}\}$ – оптимальный вариант; F^w – приведенные затраты на строительство и эксплуатацию w -го варианта сооружений БХО сточных вод; U^w – величина экономического ущерба, наносимого окружающей среде сбросом очищенных сточных вод в природные водоемы; P_r – символ вероятности; c_{wj} , c_j^{lim} , Δc_{wj} – соответственно концентрация j -й примеси в природном водоеме – приемнике очищенных сточных вод для w -го варианта сооружений, ее предельно допустимое значение и некоторый «запас»; δ_{C_j} – значения вероятностей, с которыми обеспечивается запас по c_j ; J – количество примесей; α – «запас» при оценке эффекта суммарного воздействия примесей на водные объекты; Θ – число лимитирующих показателей вредности (ЛПВ); J_θ – число примесей в воде водоема для θ -го показателя ЛПВ; $\overline{C}_{\text{вх}}$, $\overline{C}_{\text{вых}}$, $\overline{C}_{\text{фон}}$ – соответственно вектор-функции концентраций вредных примесей на входе и выходе станции БХО и их фоновых значений; \overline{Q} – вектор-функция входных потоков сточных вод; \overline{q} – вектор-функция уровней качества сточных вод; Ω – множество геометрических и гидрологических характеристик промышленных площадок; Ψ – множество характеристик природного водоема (расход, скорость течения, скорость разложения примесей и др.); $\overline{M}_1(\circ) - \overline{M}_5(\circ)$ – нелинейные векторные функции (математические модели процессов синтеза сооружений БХО); \times – знак декартова произведения.

Данная задача (2.1) – (2.8) относится к классу комбинаторных задач. При такой постановке ее решение невозможно получить в связи с высокой размерностью пространства переменных состояния природо-промышленной системы, сложностью построения математических моделей распространения примесей в воде и т.д. Поэтому для практического решения задачи синтеза сооружений биохимической очистки сточных вод заменим ее последовательным рассмотрением подзадач меньшей размерности, имеющих и самостоятельное значение в процессе проектирования:

- формирование варианта структуры технологической схемы, в состав которой должны войти все необходимые стадии механической, биохимической очистки и обработки осадка;
- расчет аппаратного оформления для выбранной технологической схемы очистки;
- размещение сооружений очистной станции на генплане;
- прогнозирование качества воды в контрольном створе природного водоема (реки).

В случае отсутствия решения на каждом следующем этапе синтеза сооружений БХО сточных вод лицом, принимающим решение (ЛПР), выбирается другой «оптимистичный» вариант решения задачи предыдущего этапа.

2.2 Автоматизированное решение задачи формирования структуры технологической схемы очистки сточных вод

Задача выбора технологической схемы системы очистки из множества вариантов на основании математических критериев оптимальности до настоящего момента решалась редко вследствие сложности накладываемых на систему условий, а также большого количества критериев оценки [12]. Наиболее прогрессивным методом решения этой задачи является применение экспертных систем. Чтобы среди множества вариантов структуры процесса выбрать оптимальную систему, необходимо четко определить критерии оценки. Для системы очистки сточных вод можно предложить множество критериев оценки, которые объединены в 3 большие группы: «затраты», «устойчивость», «безопасность». В таком случае рекомендуется использовать комплексную оценку, предполагающую распределение весов между этими суммирующими группами с учетом конкретных условий. Если при составлении целостной системы из элементарных операций перечислить все их сочетания и исследовать возможность их реализации, то количество сочетаний будет велико, что может повлиять на эффективность экспертной системы. В связи с этим используются оценки специалистов, которые из множества вариантов определяют наиболее приемлемые (например, вариант системы, который уже проектировался на практике и положительно себя зарекомендовал).

Экспертные системы обладают следующим рядом преимуществ:

- модульностью и простотой, т.е. при изменении или дополнении правил, а также при использовании нового оборудования, эти правила и оборудование вносятся в базу знаний без изменения всей структуры автоматизированного выбора в целом;
- реалистичностью, так как многие математические модели слишком сложны и абстрактны, и не редко вносят в системы ряд упрощений, здесь же используются практически наработки специалистов в данной области.

2.2.1 Постановка задачи формирования структуры технологической схемы очистки сточных вод

Исходя из выше приведенных особенностей использования экспертных систем, предлагается следующая постановка задачи формирования варианта структуры технологической схемы, в состав которой должны войти все необходимые стадии механической, биохимической очистки и обработки осадка: необходимо найти последовательность элементарных операций процесса очистки сточных вод от примесей солей азота и фосфора до требуемых концентраций $\bar{C}_{\text{необх}}$ таких, что при выполнении условий:

$$\bar{C}_{\text{факт}} \leq \bar{C}_{\text{необх}}, \quad q_{\text{нач}} = 0, \quad q_{\text{факт}} \geq q_{\text{необх}} \quad (2.9)$$

справедливо следующее:

$$t_{\text{opt}} = \arg \min_{t \in T} F^1(t) . \quad (2.10)$$

Критерий оптимальности F^1 представляет собой сумму приведенных затрат совокупности стадий очистки K^1 и затрат на аренду земельного участка A^1 , имеющего площадь, необходимую для реализации этих стадий. Данный критерий не дает точной величины затрат, так как на данной стадии проектирования имеется лишь информация о стадиях очистки, на основании которой с помощью экспертных оценок можно приблизительно оценить стоимость реализации той или иной схемы очистки. Составляющие критерия F^1 представляют собой функции:

$$K^1 = \sum_{i=1}^{N'_i} k_i(x_i, q_i, \bar{Q}), \quad A^1 = \sum_{i=1}^{N'_i} a_i(x_i, q_i, \bar{Q}). \quad (2.11)$$

Здесь N' – количество стадий процесса очистки сточных от примесей солей азота и фосфора; $q_{\text{нач}}$, $q_{\text{факт}}$, $q_{\text{необх}}$ – соответственно начальный, конечный и требуемый уровень качества воды (см. табл. 2.1); X – множество элементарных операций очистки сточных вод от

2.1 Зависимости концентраций примесей от уровня качества воды

Уровень качества воды q	Концентрация БПК ₅ , мг/л	Концентрация взвешенных веществ, мг/л	Концентрация общего фосфора, мг/л	Концентрация азота по Кьельдалю, мг/л	Концентрация общего азота, мг/л
0	50 – 280	230	11	30	30
1	70 – 170	30 – 110	2 – 10	30	30
2	30 – 40	30	8	30	30
3	15 – 20	15 – 20	2	30	30
4	10	10	1	30	30
5	10	5	1	30	30
6	5	3	<1	30	30
7	15 – 25	15 – 25	2	1	30
8	10 – 15	10 – 15	8	1	30
9	10	5	8	1	30
10	5	3	8	1	30
...
20		3	<1		

примесей солей азота и фосфора; t_{opt} – комбинация, состоящая из элементарных x_i -х операций, при которой критерий оптимальности достигает минимального значения, $x_i \in X$; $k_i(\circ)$, $a_i(\circ)$ – соответственно нелинейные функции затрат (капитальных, эксплуатационных и за аренду земли) для i -й стадии очистки; N'_i – число стадий для t -й комбинации стадий очистки; \bar{Q} – вектор-функция входных потоков сточных вод.

Используя опыт, накопленный при проектировании процессов очистки сточных вод, в виде базы данных (базы знаний) и задав некоторую цель, например, качество очищенной воды, при помощи механизма принятия решения можно найти сочетание элементарных операций (стадий очистки), обеспечивающих достижение этой цели. Фрагмент примерной базы данных приведен в табл. 2.2. В базе знаний собраны правила, эмпирические знания и общие данные, которыми обладают специалисты. Правила построены по типу «если... (посылка), то... (закключение)». Комбинируя несколько элементарных опера-

ций, обладающих разной эффективностью очистки, формируется целостная система. Прежде всего выбираются осуществимые варианты структуры системы, используя информацию о качестве воды, поступающей на каждую из элементарных операций, и о сочленяемых операциях. Затем выбирается оптимальная система очистки сточных вод на основе оценок по затратам: капитальным на строительство, эксплуатационным на содержание и на аренду земельного участка.

Структура известных процессов очистки жидкой фазы сточных вод выбрана на основе опыта, накопленного за долгие годы на множестве объектов.

2.2.2 АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Формирование множества допустимых вариантов технологических схем очистки осуществляется использованием эвристического алгоритма. Сначала выражаем в форме правил связь между элементарными операциями, способными обеспечить намеченные параметры качества воды, связь между качеством поступающей сточной воды и качеством вытекающей воды, связь выбранной элементарной операции с предшествующей ей операцией и другие аналогичные зависимости. Затем записываем намеченные параметры качества воды в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) ПЭВМ в качестве цели и в случае соответствия содержимого ОЗУ с посылкой правила используем это правило и переписываем содержимое ОЗУ.

Используя эти правила, можно выбирать элементарные операции, способные обеспечивать целевое качество воды, в направлении от конца, помещая перед каждой операцией сочетаемую с ней элементарную операцию вплоть до самого начала, и составлять варианты структуры процесса. Рассмотрим данный подход на примере выбора конкретной стадии системы очистки сточных вод. Допустим, текущей рассматриваемой операцией является очистка сточных вод активным илом (с1). Данную операцию возможно использовать только тогда, когда поступающая вода имеет уровень качества равный единице, т.е. когда она подверглась очистке на предыдущей стадии процессами (а1) – (а3). То есть имеются три возможных цепочки для достижения второго уровня качества с использованием очистки сточных вод активным илом.

2.2 Технологические процессы очистки сточных вод от примесей азота и фосфора

Код операции	Наименование технологического процесса (операции)	Предшествующая стадия	Качество воды до стадии	Качество воды после стадии
aa	предварительное усреднение			0
ab	нагнетание воды	aa	0	0
a1	обычное осаждение	aa	0	1
a1	обычное осаждение	ab	0	1
a2	осаждение с коагуляцией известью	aa	0	1
a2	осаждение с коагуляцией известью	ab	0	1
a3	осаждение с коагуляцией сернокислым алюминием	aa	0	1
a3	осаждение с коагуляцией сернокислым алюминием	ab	0	1

...
b1	капельная био- фильтрация	a1	1	2
b1	капельная био- фильтрация	a3	1	3
c1	очистка активным илом	a1	1	2
c2	очистка активным илом	a3	1	3
t1	очистка с помощью вращающихся дис- ков	a1	1	2
g1	нитрификация	b1	2	8
g2	нитрификация	a3	1	7
h1	денитрификация	g1	8	13
...
j1	хлорирование	a2	1	8
j2	хлорирование	b1	2	13
...

В заключение из всего множества возможных технологических схем выбирается та, для которой критерий F^1 достигает минимального значения. Так как размерность множества не превышает 10^4 , то учитывая быстроедействие современных ПЭВМ, решение сводится к последовательному перебору всех вариантов схем. Описанный алгоритм реализован в виде отдельной программы на языке Visual Basic для работы под управлением Windows 95, (NT). Результаты решения задачи выбора структуры технологической схемы для очистных сооружений населенных пунктов Тамбовской обл. приведены в разделе 4.1.

2.3 Автоматизированный расчет аппаратурного оформления технологической схемы очистки сточных вод

Следующим этапом решения задачи синтеза сооружений БХО является расчет и выбор оборудования для выбранной технологической схемы. Задача оптимального проектирования комплекса сооружений для очистки сточных вод и обработки осадка заключается в определении состава сооружений и их технологических параметров, обеспечивающих минимальное значение приведенных затрат при заданных входных и выходных параметрах.

2.3.1 Постановка задачи расчета аппаратурного оформления технологической схемы очистки сточных вод

Данная задача формулируется следующим образом: для каждой стадии очистки необходимо найти тип, геометрические характеристики и количество каждого типа оборудования, осуществляющего процесс очистки сточных вод от примесей азот- и фосфорсодержащих соединений, т.е.

$$r_{\text{opt}} = \arg \min_{r \in R} F^2(r), \quad r = (r_M, r_B, r_O),$$

$$F^2 = \sum_{i=1}^{N_M''} F_{Mi}^2(r_{Mi}, \bar{C}_{\text{мех.ф}}, \bar{Q}_{\text{мех}}) + \sum_{j=1}^{N_B''} F_{Bj}^2(r_{Bj}, \bar{C}_{\text{биол.ф}}, \bar{Q}_{\text{биол}}) +$$

$$+ \sum_{k=1}^{N_O''} F_{Ok}^2(r_{Ok}, \bar{C}_{\text{о.ф}}, \bar{Q}_O) + U^2(\bar{C}_{\text{вых.ф}}, \bar{C}_{\text{фон}}, \bar{Q}, \Psi),$$

$$r_M \in R_M, \quad r_B \in R_B, \quad r_O \in R_O,$$

$$R_M = (T_M'', L_M'', N_M''), \quad R_B = (T_B'', L_B'', N_B''),$$

$$R_O = (T_O'', L_O'', N_O''),$$

при выполнении условий:

$$\bar{C}_{\text{мех.ф}} \leq \bar{C}_{\text{мех.ф}}^{\text{доп}}, \quad \bar{C}_{\text{биол.ф}} \leq \bar{C}_{\text{биол.ф}}^{\text{доп}}, \quad \bar{C}_O \leq \bar{C}_{\text{о.ф}}^{\text{доп}}, \quad (2.13)$$

где F_M^2, F_B^2, F_O^2 – соответственно приведенные затраты на строительство и эксплуатацию сооружений механической, биологической очистки и обработки осадка; U^2 – величина экономического ущерба, наносимого окружающей среде сбросом очищенных сточных вод в природные водоемы; R_M, R_B, R_O – соответственно множества вариантов аппаратного оформления для стадий механической, биологической очистки и обработки осадка; T_M'', T_B'', T_O'' – соответственно множества типов оборудования для выбранных стадий механической, биологической очистки и обработки осадка; L_M'', L_B'', L_O'' – соответственно множества геометрических характеристик оборудования (габаритные размеры сооружения такие, как длина, ширина, диаметр и т.д.), а также основные размеры его элементов (распределительная камера, днище, илораспределители и т.д.), взятые из электронного справочника; N_M'', N_B'', N_O'' – соответственно количество оборудования на каждой стадии; $\bar{C}_{\text{мех.ф}}^{\text{доп}}, \bar{C}_{\text{биол.ф}}^{\text{доп}}, \bar{C}_O^{\text{доп}}, \bar{C}_{\text{мех.ф}}, \bar{C}_{\text{биол.ф}}, \bar{C}_{\text{о.ф}}$ – соответственно векторы требуемых и фактических характеристик (концентрации примесей, влажность осадка и др.) для каждой стадии очистки.

Математическая модель системы очистных сооружений включает зависимости для расчета объема сооружений и определения параметров оборудования, основанные на рекомендациях действующего СНиП [46] с корректировками и дополнениями, которые базировались на результатах исследований ВНИИ ВОДГЕО. Техничко-экономические показатели сооружений определяются на основе обобщений, также выполненных лабораторией экономических исследований ВНИИ ВОДГЕО [2]. Для сооружений, для которых отсутствовали зависимости, приведенные в работе [2], авторами проведена аппроксимация значений затрат для сооружений различных габаритных размеров из каталога сооружений и получена расчетная зависимость приведенных затрат от объема сооружения (см. табл. 2.3). Величина экономического ущерба рассчитывается по методике, приведенной в работах [6, 32].

2.3 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОИМОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА И МОНТАЖА ОТДЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ СТАНЦИИ БХО

№ п/п	Сооружения, оборудование и их парамет- ры	Единица измере- ния	Расчетная зависи- мость
1	Первичные отстойники: капитальные		

	затраты \tilde{Z}_{q1} приведенные затраты $\tilde{\Pi}_1$	тыс. р. тыс. р./год	$\tilde{Z}_{q1} = (0,077V_1 + 7,98D_1 - 22,85) \times$ $\times \tilde{N}_1 / 4$ $\tilde{\Pi}_1 = 0,131 \cdot \tilde{Z}_{q1}$
2	Аэротенки: капитальные затраты \tilde{Z}_{q2} приведенные затраты $\tilde{\Pi}_2$ ($\tilde{Z}_{q'2}$ – стои- мость возду- ходувной станции; $\tilde{Z}_{q''2}$ – стои- мость потреб- ляемой элек- троэнергии)	тыс. р. тыс. р./год	$\tilde{Z}_{q2} = 0,131V_2 + 98,4$ $\tilde{\Pi}_2 = 0,131(\tilde{Z}_{q2} + \tilde{Z}_{q'2}) + \tilde{Z}_{q''2}$
3	Вторичные отстойники: капитальные затраты \tilde{Z}_{q3}	тыс. р.	$\tilde{Z}_{q3} = (446,73 + 1,84D_3 + 0,15V_3) \times$ $\times N_3 / 4$

Продолжение табл. 2.3

№ п/п	Сооружения, оборудование и их парамет- ры	Единица измере- ния	Расчетная зависи- мость
----------	--	---------------------------	----------------------------

4	Сооружения для аэробной стабилизации: капитальные затраты \tilde{Z}_{q4} приведенные затраты $\tilde{\Pi}_4$ (\tilde{Z}'_{q4} – стоимость воздухоудв. станции; \tilde{Z}''_{q4} – стоимость потребляемой электроэнергии)	тыс. р.	$\tilde{Z}_{q4} = 0,13V_4 + 98,4$	
		тыс. р./год	$\tilde{\Pi}_4 = 0,131 \cdot (\tilde{Z}_{q4} + \tilde{Z}'_{q4}) + \tilde{Z}''_{q4}$	
5	Воздуходувные станции: капитальные затраты \tilde{Z}_{q5}	тыс. р.	Производительность, тыс. м ³ /ч	\tilde{Z}_{q5}
			5	104
			10	108
			40	203
			60	327
			90	377
			270	924

Здесь V_i , D_i , N_i – соответственно объем, диаметр, число сооружений i -го вида.

2.3.2 Алгоритм решения задачи расчета аппаратного оформления сооружений биохимической очистки сточных вод

В связи с небольшим количеством стандартных сооружений очистки каждого типа (например, для аэротенков-смесителей существует 10 типовых проектов) при нахождении глобального минимума приведенных затрат по каждой стадии очистки (2.12) – (2.13) целесообразно использовать метод полного перебора.

Информация о типовых проектах каждого вида очистки сгруппирована в базе данных. Она представляет собой электронный справочник, разработанный в среде «Access'97» [40]. Источником информации для базы данных является справочник строительных конструкций и сооружений, использующийся при выборе стандартного оборудования для системы очистки сточных вод. Он представляет собой каталог типовых проектов сооружений для очистки с технической информацией о самом оборудовании, его основных частях (экспликация сооружений и оборудования) и используемом материале при строительстве, условиях его использования, а также включает в себя калькуляцию затрат по используемым материалам и ресурсам.

При разработке программного обеспечения решения этой и других подзадач для ЛПП предусмотрена возможность оставить для дальнейшего рассмотрения и варианты решения, для которых значения критерия F^2 удовлетворяют условию:

$$F^{2,o} \tilde{k}_2 \leq F^{2,\text{opt}}, \quad \tilde{k}_2 < 1, \quad o = \overline{1, \tilde{O}_2}, \quad (2.14)$$

где \tilde{k}_2 – коэффициент, расширяющий множество решений задачи, используемых при дальнейшем рассмотрении (задается ЛПР); $F^{2,o}$ – значение критерия задачи для o -го варианта решения; \tilde{O}_2 – множество допустимых решений.

Это связано с тем, то основу методики расчета, реализованной в СНиП [46], чаще всего составляют эмпирические зависимости, не учитывающие отдельных особенностей технологических процессов очистки для конкретных стоков. Поэтому для окончательного выбора варианта аппаратного оформления очистных сооружений необходимо проведение расчетов по прогнозированию качества воды на выходе станции в условиях неучтенных изменений расходов, температуры и других характеристик, а также содержания в водоеме-приемнике очищенных сточных вод растворенного кислорода и примесей в зависимости от степени очистки стоков на станции БХО и эффективности процессов самоочищения в водоеме.

Результаты решения задачи для ряда сооружений приведены в разделе 4.1.

2.4 Автоматизированное проектирование генерального плана сооружений биохимической очистки сточных вод

Современные сооружения биохимической очистки (БХО) сточных вод крупных промышленных предприятий и населенных пунктов представляют собой сложный комплекс взаимосвязанных объектов основного и вспомогательного назначения. Можно выделить следующие функциональные группы объектов: производственные, транспортно-складские, подсобные объекты инженерного обеспечения и ремонтной службы, объекты административно-хозяйственного и бытового назначения. Выбор площадок для строительства сооружений БХО сточных вод, планировка и застройка их территорий регламентированы требованиями СНиП [13, 46, 47] и рекомендациями, приведенными в работе [27]. Выбор оптимальных объемно-планировочных решений по размещению станции БХО сточных вод невозможен традиционными ручными методами. Повышение качества проектных работ с одновременным сокращением сроков проектирования возможно только на основе широкого использования в процессе поиска оптимальных проектных решений современной вычислительной техники, что в свою очередь невозможно без разработки математических моделей, методов и алгоритмов решения соответствующих задач.

Формирование генерального плана станции по очистке сточных вод с использованием средств вычислительной техники представляет собой сложную задачу размещений зданий и сооружений различных функциональных групп с учетом укрупненных технологических, инженерных и транспортных коммуникаций и природно-климатических особенностей территориального района [47]. Эффективность решения такой задачи зависит от большого числа факторов, значительная часть которых трудно формализуема. Качество решения задачи, с точки зрения проектировщика, зависит от числа размещаемых объектов и их габаритов, количества минимальных и максимальных разрывов между объектами, подлежащих обязательному соблюдению, заполненности территории объектами других производств, конфигурации существующих на площадке магистралей и т.п.

Если решение задачи осуществляется для площадки с уже размещенными объектами, то актуальным становится вопрос о делении или блокировке объектов. В этом случае может возникнуть необходимость в разрыве технологической схемы и, как следствие этого, изменении его аппаратного оформления [2].

2.4.1 Постановка задачи проектирования генплана

Осуществим формализацию задачи размещения объектов станции на генплане. Для этого введем ряд допущений и обозначений.

Допущения:

1) Размещение объектов осуществляется в трехмерном пространстве с метрикой

$$\rho((x_{o_i}, y_{o_i}, z_{o_i}), (x_{o_j}, y_{o_j}, z_{o_j})) = |x_{o_i} - x_{o_j}| + |y_{o_i} - y_{o_j}| + |z_{o_i} - z_{o_j}|;$$

$$\forall i, j \in [1, \dots, N],$$

где $(x_{o_i}, y_{o_i}, z_{o_i}), (x_{o_j}, y_{o_j}, z_{o_j})$ – координаты центра объектов с номерами i, j ; N – число размещаемых объектов.

2) Объекты задаются в форме параллелепипедов или цилиндров.

3) Инженерные коммуникации, связывающие объекты и источники энергии, коллекторы подвода сточных вод, направляемых на очистку, задаются в виде совокупностей ортогональных фрагментов определенной ширины.

4) Территория разбита на кварталы (модули) с заданными размерами. В процессе размещения объектов допускается изменение размеров кварталов.

5) Фасады объектов максимально приближены к границам кварталов (модулей), на территории которых они размещаются.

6) Подъездные пути проходят (преимущественно) по границам модулей.

7) В одном модуле размещается одна или несколько групп объектов основного и вспомогательного назначения; группа формируется по производственному принципу.

Обозначения:

1) Территория (область U), на которой осуществляется размещение объектов, задается в форме односвязного многоугольника на плоскости ($z = 0$). Область U делится на кварталы (модули), с учетом уже сформировавшейся части района строительства. Внутри области U необходимо разместить N соединенных определенным образом объектов с размерами $x_{p_i}, y_{p_i}, z_{p_i}, x_{d_i}$ (x_{d_i} – для объектов, проекция которых на плоскость задана в виде окружности), $i = \overline{1, N}$.

2) Вариант генплана представим как $w = (w^r, w^t)$, где w^r – вариант размещения объектов $w^r = \{w_i^r \mid i = \overline{1, N}\}$; w^t – вариант трассировки инженерных коммуникаций $w^t = \{w_j^t \mid j = \overline{1, N_{k1} + N_{k2}}\}$; $w \in W \subset \Omega$, где W – множество допустимых вариантов формирования генплана; Ω – множество всех возможных вариантов формирования генплана; N_{k1}, N_{k2} – соответственно число групповых и одиночных трасс инженерных коммуникаций; $\Omega = \Omega^r \times \Omega^t$, где Ω^r, Ω^t – соответственно множества вариантов размещения объектов и трассировки коммуникаций.

3) Условия, характеризующие правила размещения объектов и трассировки инженерных коммуникаций, $M : \Omega \rightarrow W$ или $W = M(\Omega)$ назовем моделью проектного решения.

С учетом приведенных обозначений, задача проектирования генерального плана станции БХО формулируется, как найти

$$w^* = \arg \min \{F(w) \mid w \in W = M(\Omega)\}. \quad (2.15)$$

В качестве целевой функции F примем следующие затраты:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4, \quad (2.16)$$

где F_1, F_2 – соответственно стоимость территории, занятой под объекты и коммуникации; F_3 – стоимость коммуникаций; F_4 – удорожание (удешевление) стоимости объектов от деления их на части (блокировки с другими объектами).

Составляющие критерия определяются по приведенным ниже вычислениям.

$$F_1 = \sum_{i=1}^N x_{p_i} y_{p_i} s u_i'(x_{o_i}, y_{o_i}), \quad (2.17)$$

где $s u_i'$ – стоимость единицы площади территории, занятой под i -й объект.

$$F_2 = \sum_{j=1}^{N_{k1}} \sum_{m=1}^{M'_j} l'_{jm}(x_{o_i}, y_{o_i}) \cdot lk'_j \cdot su''_{jm}(x_{o_i}, y_{o_i}) + \sum_{t=1}^{N_{k2}} \sum_{l=1}^{M''_t} l''_{tl}(x_{o_i}, y_{o_i}) \cdot lk''_t \cdot su'''_{tl}(x_{o_i}, y_{o_i}), \quad (2.18)$$

где M'_j, M''_t – число кварталов, по территории которых проходят групповые и одиночные трассы; su''_{jm}, su'''_{tl} – соответственно стоимость единицы площади, занятой под групповые и одиночные трассы; $l'_{jm}, l''_{tl}, lk'_j, lk''_t$ – соответственно длина и ширина площади, занятой под групповые и одиночные трассы; N_{k1}, N_{k2} – соответственно число групповых и одиночных трасс.

$$F_3 = \sum_{j=1}^{N_k} (sk_j lz_j + sl_j nl_j), \quad (2.19)$$

где N_k – число всех коммуникаций; lz_j, sk_j – соответственно длина и стоимость единицы длины j -й коммуникации; sl_j – затраты на эксплуатацию и техническую реализацию одного поворота для j -й коммуникации; nl_j – число поворотов j -й коммуникации.

$$F_4 = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i so_i, \quad (2.20)$$

где so_i – стоимость i -го объекта; ε_i – коэффициент, учитывающий блокировку (деление объекта на части); $\varepsilon_i < 0$ – i -й объект блокируется с другими объектами; $\varepsilon_i = 0$ – i -й объект размещается отдельно стоящим с учетом всех санитарно-технических и противопожарных ограничений; $\varepsilon_i > 0$ – i -й объект делится на части.

Задача формирования генерального плана сооружений БХО относится к классу комбинаторных задач.

2.4.2 Математическая модель проектного решения

Для описания правил размещения объектов станции БХО и трассировки коммуникаций необходимо задать достаточно большое количество исходной информации. Рассмотрим некоторую из них.

Проектируемые объекты различных функциональных групп связаны между собой инженерными коммуникациями. Различают наземные и подземные коммуникации. К наземным относятся: эстакады материалопроводов, кабельные линии; к подземным – сети водопровода, водостока, кабельные сети электроснабжения, связи и сигнализации.

При решении задачи необходимо знать расположение источников энергии (ЛЭП, магистральные трубопроводы, природные водоемы – приемники очищенных сточных вод), расположенные за пределами области, а также транспортные коммуникации, проходящие в области U (автодорога, коллектор и т.п.).

На территории U существуют зоны, где строительство недопустимо вообще (наличие водоемов, действующих объектов и т.п.). На территории строительства могут существовать зоны, где целесообразно разместить объекты определенного назначения. Например, природные водоемы (озера, запруды и т.п.) можно использовать в качестве биологического пруда и т.д.

Для отдельных объектов важны минимальные и максимальные допустимые расстояния между объектами и границей области U , а также между объектами для отдельных производственных комплексов (блоков), входящих в состав проектируемой станции,

Многие виды коммуникаций при прокладке их по территории строительства имеют зоны, в пределах которых недопустимо строительство каких-либо объектов и прокладка других коммуникаций. Для них надо задать противопожарные и санитарные разрывы между различными коммуникациями и между коммуникациями и объектами.

Рассмотрим правила размещения объектов и коммуникаций:

Условие 1. Необходимость соблюдения санитарно-технических и противопожарных разрывов:

а) между объектами: $\forall i, c \in [1, \dots, N]$

$$\left(|x_{o_i} - x_{o_c}| - \frac{xp_i + xp_c}{2} \geq l'_{ic} \right) \vee \left(|y_{o_i} - y_{o_c}| - \frac{yp_i + yp_c}{2} \geq l'_{ic} \right); \quad (2.21)$$

б) между коммуникациями и объектами, не являющимися точками «истока» и «стока» для соответствующих коммуникаций: $\forall i \in \overline{1, N}, \quad \forall j \in \overline{1, N_k}$

$$\left(|x_{o_i} - xc_j| - \frac{xp_i + lk_j}{2} \geq l2''_{ij} \right) \vee \left(|y_{o_i} - yc_j| - \frac{yp_i + lk_j}{2} \geq l2''_{ij} \right), \quad (2.22)$$

где xc_j, yc_j, hc_j – координаты точки c_j , принадлежащей групповой или одиночной трассе;

в) между коммуникациями:

$$\left(|xc_j - xc_h| - \frac{lk_j + lk_h}{2} \geq l2'_{jh} \right) \vee \left(|yc_j - yc_h| - \frac{lk_j + lk_h}{2} \geq l2'_{jh} \right) \vee \left(|hc_j - hc_h| - \frac{h'k_j + hk_h}{2} \geq l2'_{jh} \right). \quad (2.23)$$

Условие 2. Образование застойных зон с повышенной концентрацией выбрасываемых в атмосферу веществ (хлора и др.) исключает размещение объект в секторе с углом $\alpha 0_i$, образуемым линией фасада i -го объекта (осью OX относительной системы координат для объекта) с направлением преобладающих ветров:

$$\alpha 0_i \leq 180^\circ, \quad i = \overline{1, N_\alpha}, \quad (2.24)$$

где N_α – число объектов, для которых вводится данное ограничение.

Условие 3. Прокладка коммуникаций осуществляется на заданных уровнях:

$$H_j = (\pm h_{jt}^0)_{E_j}, \quad j = \overline{1, N_k}, \quad (2.25)$$

где E_j – число возможных уровней прохождения j -й коммуникации; h_{jt}^0 – t -й уровень прокладки j -й коммуникации, знак (+) или (–) определяет расположение трассы относительно поверхности земли.

Условие 4. Соблюдение максимальных расстояний между объектами отдельного производственного комплекса обеспечивается выполнением неравенства:

$$\forall i, c \in \overline{1, D}, \quad k \in \overline{1, N_{md}}; \quad \left(|x_{o_i} - x_{o_c}| - \frac{xp_i + xp_c}{2} \leq l3''_{ik} \right) \vee \left(|y_{o_i} - y_{o_c}| - \frac{yp_i + yp_c}{2} \leq l3''_{ik} \right). \quad (2.26)$$

Условия (2.21) – (2.26), характеризующие правила размещения объектов и коммуникаций на генплане предприятия, и необходимая для них исходная информация представляют собой математическую модель проектного решения.

2.4.3 Алгоритм решения задачи проектирования генплана

Исходя из особенностей математической модели формирования генерального плана сооружений БХО сточных вод, предлагается алгоритм решения задачи, базирующейся на совмещении процесса размещения объектов и трассировки коммуникаций. Укрупненная блок-схема алгоритма представлена на

рис. 2.1. Сущность алгоритма сводится к следующему.

1 Из множества размещаемых объектов выделяются группы, относящиеся к отдельным производственным комплексам (блокам). Если площадь, занимаемая блоком с номером d , $d = 1, \dots, D$, отнесенная к площади квартала, значительно меньше принятой для подотрасли минимальной плотности застройки кварталов, то делается попытка объединения d -го комплекса с другими производственными комплексами или объектами



Рис. 2.1 Укрупненная блок-схема алгоритма решения задачи

генплана станции БХО сточных вод

других функциональных групп с учетом правил размещения объектов (2.21) – (2.26), плотность застройки которых при их отдельном размещении в квартале минимальна. Объединение производится исходя из связей между блоками. Очередность размещения блоков определяется из следующих соображений: блок, занимающий большую площадь с учетом величин санитарно-технических разрывов между объектами, имеет более высокий приоритет при размещении.

ДЛЯ ВЫБРАННОГО D -ГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ КВАРТАЛ (НЕСКОЛЬКО КВАРТАЛОВ, ЕСЛИ КОМПЛЕКС ЗАНИМАЕТ БОЛЬШУЮ ПЛОЩАДЬ), НА ТЕРРИТОРИИ КОТОРОГО ОН БУДЕТ РАЗМЕЩЕН. КРИТЕРИЕМ ОЦЕНКИ ВЫБОРА КВАРТАЛА ЯВЛЯЕТСЯ СТОИМОСТЬ ОПТИМАЛЬНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ ТРАСС КОММУНИКАЦИЙ ОТ ГРАНИЦЫ КВАРТАЛА ДО ВНЕШНИХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ И ТРАНСПОРТНЫХ КОММУНИКАЦИЙ, Т.Е. ВНЕШНИХ КОММУНИКАЦИЙ ДЛЯ РАССМАТРИВАЕМОГО КОМПЛЕКСА, ИСХОДЯ ИЗ ДОПУЩЕНИЙ, ПРИНЯТЫХ ПРИ ОПИСАНИИ МОДЕЛИ. ОПТИМАЛЬНЫМИ СЧИТАЮТСЯ ТРАССЫ, ПРОВЕДЕННЫЕ ВНУТРИ ПРЯМОУГОЛЬНИКА, ОХВАТЫВАЮЩЕГО

«ИСТОКИ» И «СТОКИ» КОММУНИКАЦИЙ. ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО КВАРТАЛА ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ МЕТОДОМ КООРДИНАТНОЙ РЕЛАКСАЦИИ. В КАЧЕСТВЕ НАЧАЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ВЫБИРАЕТСЯ КВАРТАЛ, ДО ГРАНИЦ КОТОРОГО КОММУНИКАЦИЯ С МАКСИМАЛЬНОЙ УДЕЛЬНОЙ СТОИМОСТЬЮ ИМЕЕТ МИНИМАЛЬНУЮ ДЛИНУ. ВЫБОР КВАРТАЛА ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ СЛЕДУЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ, ИСХОДЯ ИЗ МИНИМУМА СТОИМОСТИ КОММУНИКАЦИЙ С ВНЕШНИМИ ИСТОЧНИКАМИ И ОБЪЕКТАМИ УЖЕ РАЗМЕЩЕННОГО (РАЗМЕЩЕННЫХ) КОМПЛЕКСА (КОМПЛЕКСОВ). ПРИ НАЛИЧИИ ЗОНЫ ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ОПРЕДЕЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПРОЦЕСС КОМПОНОВКИ НАЧИНАЕТСЯ С ДАННЫХ ОБЪЕКТОВ И КВАРТАЛА, ВКЛЮЧАЮЩЕГО СООТВЕТСТВУЮЩУЮ ЗОНУ.

1. Так как полученное размещение комплексов из-за ряда допущений может быть не оптимальным, произведем оптимизацию начального размещения комплексов с помощью итерационного алгоритма, основанного на парных перестановках комплексов. В связи с тем, что для отдельных комплексов (блоков) существуют типовые проекты (например, для блока двух коридорных аэротенков с размерами коридора $6 \times 4,6 \times 42$ м и вторичных горизонтальных отстойников – проект 902-2-442.87 [13]), в которых приводятся рекомендуемые варианты размещения сооружений внутри блока с трассировкой отдельных внутренних коммуникаций. В этом случае можно, задав вариант размещения внутри блока и обеспечив его ориентацию в области U , выполнить трассировку внешних коммуникаций (см. пункт 5).

2. В целях получения наиболее качественного размещения объектов внутри кварталов производится предварительная трассировка внешних коммуникаций с целью получения точек подвода коммуникаций к границам (вершинам) квартала. Прокладка трасс внешних коммуникаций на основе современных методов организации строительства осуществляется по границам кварталов.

3. В пределах выбранного квартала (кварталов) производится последовательное размещение объектов, относящихся к d -му производственному комплексу ($d = 1, \dots, D$). Последовательность размещения определяется, исходя из размеров (площади) объектов, начиная с объекта, имеющего максимальную площадь.

Оптимизация размещения объектов осуществляется методом координатной релаксации. Идея метода заключается в следующем: для каждого i -го объекта производится циклическая релаксация по координатам. При перемещении объекта, которое осуществляется с заданным шагом (обычно 6 м) выполняется проверка, не пересекается ли перемещаемый объект с остальными и вычисляется стоимость его связей. Если это значение меньше, чем на предыдущем шаге, то процесс продолжается; если больше предыдущего, то движение по этой координате прекращается. После размещения i -го объекта переходим к $i + 1$ -му объекту и так выполняется весь цикл. Процесс поиска заканчивается, когда изменение местоположения всех объектов не приводит к улучшению критерия.

4. При формировании генерального плана особый интерес представляет трассировка всех инженерных и транспортных коммуникаций и, в первую очередь, построение связывающих сетей однородных коммуникаций (деревьев Штейнера) [10].

Как показали экспериментальные исследования, проведенные при использовании метода, основанного на предварительном формировании сетей магистралей, порядок трассировки отдельных коммуникаций или их сетей практически не влияет на качество конечного результата. Однако для облегчения проведения трасс с использованием вышеназванного метода установим следующий порядок трассировки коммуникаций. В первую очередь, трассировке подлежат отдельные коммуникации, имеющие наименьшие санитарно-технические разрывы с объектами и число уровней прокладки, так как коммуникации, имеющие большее число уровней легче трассировать в случае пересечения с другими трассами на основном уровне. При равных условиях порядок трассировки определяется, исходя из общего эвристического правила Айкерса: коммуникации трассируются в порядке приоритетных номеров, который равен числу «истоков» или «стоков» в прямоугольнике, в рамках которого проходят оптимальные трассы. Обычно короткие фрагменты коммуникаций трассируются первыми, далее трассируются окружающие их коммуникации. После прокладки одиночных коммуникаций осуществляется трассировка коммуникаций, для которых возможна совместная прокладка в одном канале (эстакаде). Под сетью будем понимать некоторое число коммуникаций, имеющих одинаковый уровень проведения трассы, соизмеримые санитарно-технические разрывы с объектами и сравнительно малые разрывы между собой. Последовательность укладки коммуникаций в канале (эстакаде) определяется из размеров охватывающего прямоугольника. Ширина каждого ортогонального фрагмента сети определяется после проведения всех коммуникаций с учетом зон обслуживания.

Рассмотрим приближенный метод построения сетей коммуникаций (деревьев Штейнера) в ортогональной метрике. Перед началом трассировки отдельной сети формируется сеть магистралей. Построение магистралей осуществляется следующим образом: в области U проводятся линии, отстоящие для проведения внешних коммуникаций на расстоянии, определяемом санитарно-техническими нормами для данной сети коммуникаций от линии размещения объектов в кварталах (см. рис. 2.2.). Для внутренних коммуникаций это расстояние определяется санитарно-техническими нормами для объектов и коммуникаций, а также расстоянием от границы области U и уже проложенных трасс.

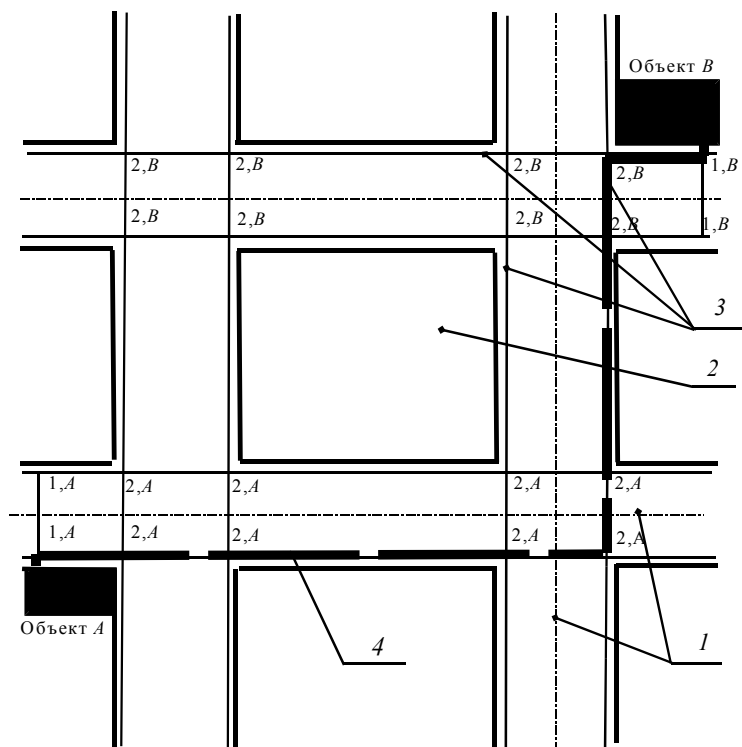


Рис. 2.2 Иллюстрация алгоритма трассировки:

- 1 – граница квартала; 2 – территория для размещения объектов;
- 3 – магистрали возможных трасс между объектами A и B ;
- 4 – оптимальная трасса

Предложенный алгоритм размещения сооружений БХО на генплане носит локальный характер, но учитывая возможность получения «хорошего» начального размещения объектов с предварительной трассировкой коммуникаций и последующего улучшения решения за счет парных перестановок и окончательной трассировки, полученное решение достаточно близко к глобальному оптимуму. При визуализации результатов решения задачи генплана предлагается использование геоинформационной системы Arcinfo 8.0.

Апробация методики автоматизированного проектирования генерального плана на примере реконструкции и расширения комплекса очистных сооружений БХО сточных вод города Моршанска Тамбовской области приведена в разделе 4.1.

Вопросы для самопроверки

- 1 Какие подзадачи решаются при синтезе сооружений биохимической очистки?
- 2 Какие группы критериев оптимальности используются при выборе структуры технологической схемы очистки?
- 3 Какой метод лежит в основе алгоритма решения задачи выбора структуры технологической схемы очистки?
- 4 Какой метод лежит в основе алгоритма решения задачи расчета оборудования технологической схемы очистки?
- 5 Какие допущения и обозначения приняты при формализации задачи размещения объектов станции биохимической очистки на генеральном плане?

6 Какие правила размещения объектов и коммуникаций используются при разработке математической модели проектного решения задачи размещения объектов станции биохимической очистки на генеральном плане?

7 Можно ли достичь глобального экстремума при решении задачи размещения объектов станции биохимической очистки на генеральном плане с использованием предложенных методов?

3 Математическое моделирование биохимических процессов в сооружениях станции очистки сточных вод и самоочищения в природных водоемах

Для проведения прогнозов качества воды необходимо построение математических моделей технологических процессов, протекающих в очистных сооружениях и водоеме-приемнике сточных вод, которые бы учитывали гидродинамические особенности потоков в сооружениях и природном водоеме, кинетические закономерности процессов и вероятностный характер их протекания. В течение ряда лет авторами был накоплен опыт использования математических моделей наиболее часто применяемых процессов: биоокисления углерод- и азотсодержащих органических соединений в аэротенке коридорного типа с распределенной подачей воды; осаждения суспензии в радиальном отстойнике; денитрификации в аппарате с перемешивающим устройством; самоочищения и распространения примесей в реке, среди которых выделены процессы аэробного окисления органики, нитрификации, денитрификации, роста и отмирания планктона, фотосинтеза, ионного обмена и др. При разработке математических моделей рассмотрим подход, согласно которому проектировщик, используя свои знания об особенностях ПТС, их сточных вод и водоема-приемника, осуществляет генерацию модели в режиме диалога с ПЭВМ. Его реализация нашла применение в подсистеме автоматизированного моделирования.

Подсистему автоматизированного моделирования представим как совокупность технических и программных средств, ориентированных на задачу выбора и имитационного исследования различных математических моделей некоторого класса химико-технологических процессов (в данном случае процессов биохимических превращений), обеспечивающую возможность оперативного участия проектировщика на всех этапах анализа результатов и принятия решений. Под автоматизированным моделированием будем понимать процесс синтеза и испытания математических моделей рассматриваемых химико-технологических процессов, реализуемый в режиме диалогового общения с подсистемой автоматизированного моделирования.

3.1 Выбор математической модели на основе качественной и количественной информации

Последовательность создания математической модели класса биохимических процессов в самом общем случае представлен в виде схемы, изображенной на рис. 3.1. Из нее следует, что для одной и той же системной модели можно предложить несколько конструктивных реализаций. Выбор конкретной из них зависит от требований, определяющих соответствие исследуемому процессу. Среди требований, предъявляемых к математическим моделям БХП, следует выделить: информативность, адекватность по целям, экономичность и др.

Информативность – учет всех необходимых переменных и связей между ними для решения задач проектирования и управления. Критерий информативности модели \tilde{I} определим в виде

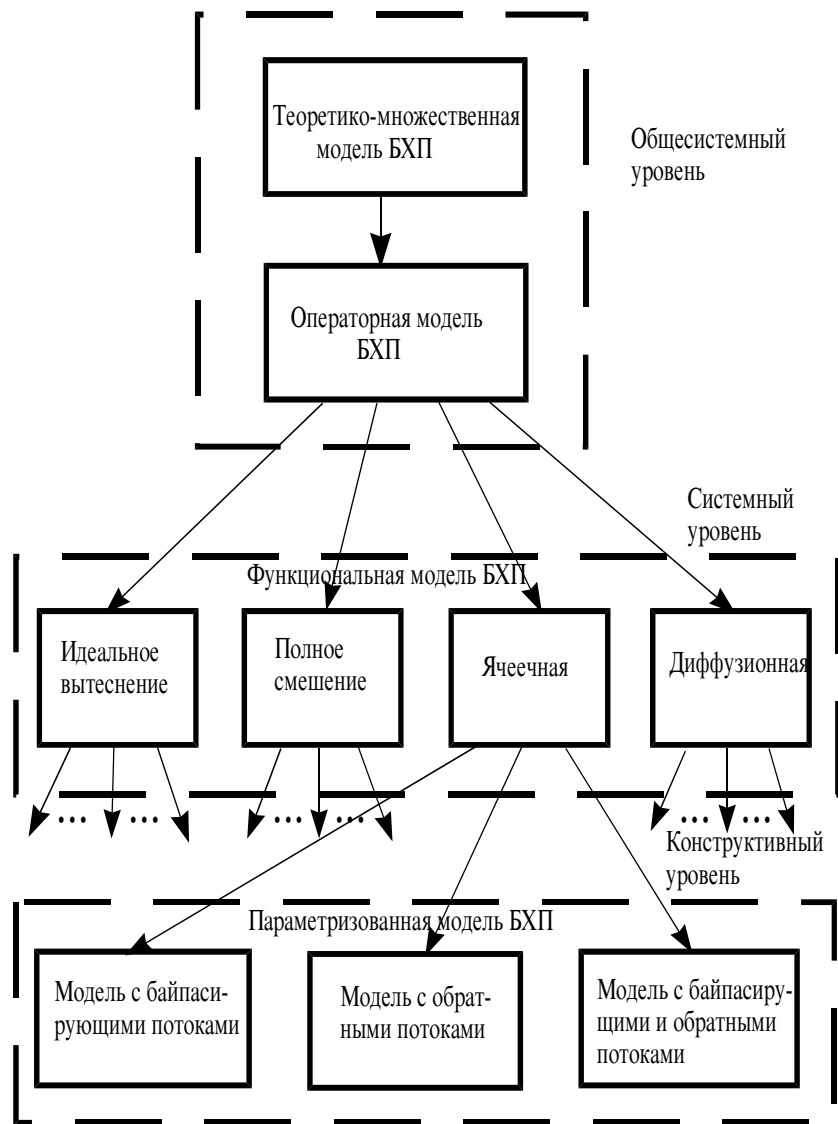


Рис. 3.1 Уровни детализации модели биохимических процессов

$$\tilde{I} = F \wedge C,$$

$$F = \prod_{i=1}^n f_i, \quad C = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{m_i} c_{ij}, \quad (3.1)$$

где $f_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я переменная требуется для решения поставленной задачи с помощью модели;} \\ 0, & \text{если } i\text{-я переменная требуется для решения поставленной задачи, но не определяется с помощью модели;} \end{cases}$

$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если для решения поставленной задачи с помощью модели объективно требуется учет связи } i\text{-й переменной с } j\text{-й;} \\ 0, & \text{если для решения поставленной задачи с помощью модели объективно требуется учет связи } i\text{-й переменной с } j\text{-й, но не воспроизводится на модели.} \end{cases}$

Модель будет информативной, если $\tilde{I} = 1$.

Адекватность по целям – соответствие конструктивной модели исследуемому объекту во всей области $\tilde{\Omega}$ возможных режимов его функционирования с точностью, удовлетворяющей целям, поставленным в решаемой задаче.

Экономичность – затраты вычислительных ресурсов ПЭВМ (оперативной памяти и машинного времени \tilde{T}), позволяющие получить решение систем уравнений модели в приемлемые сроки и с достаточной точностью.

При построении математической модели, адекватной исследуемому объекту, будем рассматривать множество реализаций конструктивных моделей класса БХП:

$$\bar{M} = \{\bar{M}_i, i = \overline{1, K_m}\},$$

где K_m – число реализаций конструктивных моделей.

Каждая модель \bar{M}_i обеспечивает определенное качество имитации БХП, которое будем характеризовать целевой функцией $\tilde{\varphi}(\bar{M}_i)$. В общем случае $\tilde{\varphi}$ является вектором $\tilde{\varphi} = (\tilde{\varphi}_1, \tilde{\varphi}_2, \dots, \tilde{\varphi}_k)$. Тогда наилучшей можно считать такую модель \bar{M}_i^* , для которой выполняется условие

$$\tilde{\varphi}(\bar{M}_i^*) = \text{opt } \tilde{\varphi}(\bar{M}_i), \quad (3.2)$$

где opt – процедура взятия максимума или минимума функции.

Вследствие ограниченности временных \tilde{T} и материальных \tilde{S} ресурсов, выделенных на поиск, нахождение \bar{M}_i^* весьма проблематично. Следует отметить, что затраты на исследование качества модели складываются из затрат на разработку математического описания, его программную реализацию и проведение численных экспериментов на ПЭВМ. В этом задачу автоматизированного моделирования БХП будем рассматривать как процесс последовательного выбора, изучения и совершенствования модели. В результате чего построим улучшающую последовательность моделей $\tilde{M} = \{\tilde{m}^1, \tilde{m}^2, \dots, \tilde{m}^{l-1}, \tilde{m}^l, \dots, \tilde{m}^r\}$, для которой в смысле установленного отношения порядка

$$\tilde{\varphi}^l(\tilde{m}) > \tilde{\varphi}(\tilde{m}^{l-1}), \quad (3.3)$$

$$\tilde{T}(\tilde{m}^l) < \tilde{T}^{\text{lim}} - \sum_{i=1}^{l-1} \tilde{T}(\tilde{m}^i), \quad (3.4)$$

$$\tilde{S}(\tilde{m}^l) < \tilde{S}^{\text{lim}} - \sum_{i=1}^{l-1} \tilde{S}(\tilde{m}^i), \quad (3.5)$$

где \tilde{T}^{lim} , \tilde{S}^{lim} – соответственно допустимые временные и денежные затраты на создание и испытание моделей.

Последний элемент улучшающей последовательности выберем в качестве имитационной модели, пригодной для исследования БХП.

Основными этапами алгоритма автоматизированного моделирования БХП являются: выбор перспективной модели $\bar{M}_i \in \bar{M}$, $i = \overline{1, K_m}$; соответственно имитационное испытание БХП на модели \bar{M}_i ; проверка принадлежности модели \bar{M}_i улучшающей последовательности; проверка возможности дальнейшего улучшения модели. Для наглядности процесс автоматизированного моделирования представлен на рис. 3.2. Выделим две характерные фазы. Первая фаза связана с разработкой структуры модели, адекватной на множестве «допустимых»

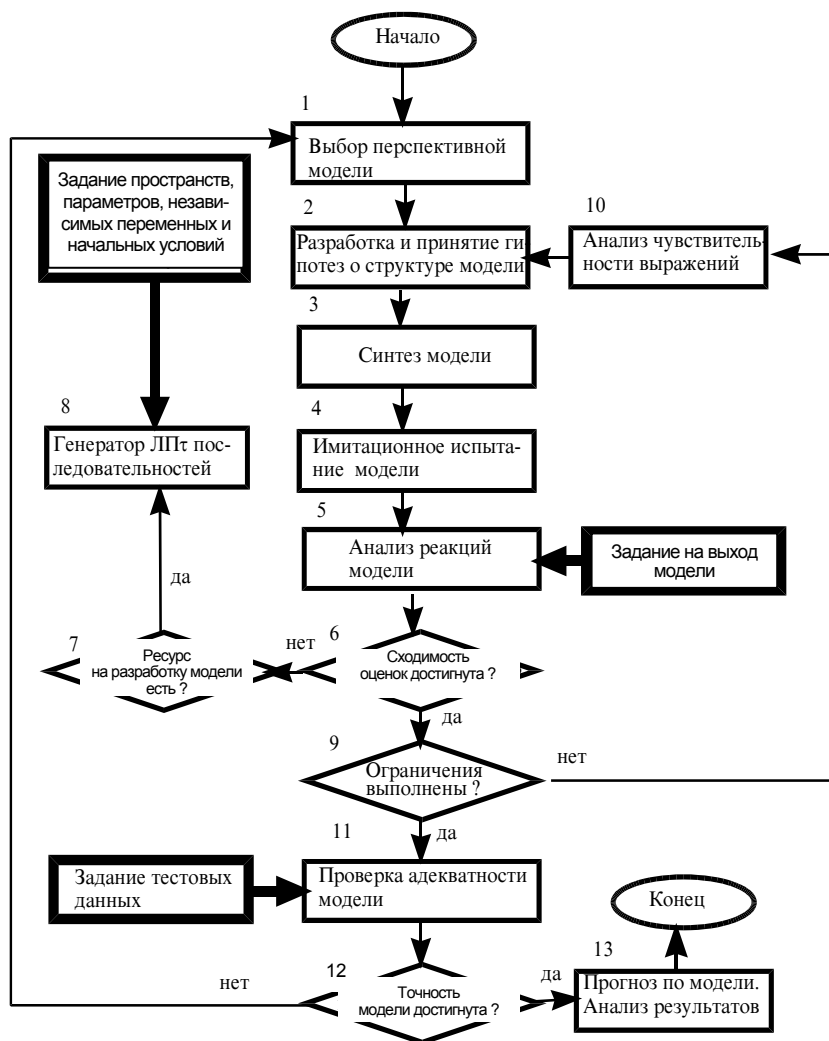


Рис. 3.2 Формализация основных этапов автоматизированного моделирования биохимических процессов

реакций (блоки 1 – 10). Вторая – с выполнением рабочих прогнозов на модели (блок 13). Жирными линиями на рис. 3.2. обозначены информационные сигналы проектировщика, одинарными – вычислительные процессы.

Выбор «кандидата» конструктивной модели $\bar{M}_i \in \bar{M}$, $i = \overline{1, K_m}$ осуществляется по критерию информативности (3.1). Для этого используются данные банка математических моделей БХП, в которых отражена полнота их переменных состояния и связность.

3.2 Имитационное исследование математических моделей биохимических процессов

Под имитационным испытанием будем понимать метод исследования, основанный на том, что изучаемая статическая или динамическая система заменяется ее имитатором – математической моделью и с ним производятся эксперименты, направленные на принятие гипотез о внутреннем строении данной системы.

Объекты, в которых протекают БХП, относятся к классу открытых систем, допускающих удовлетворительный прогноз реакций на входные воздействия лишь с точностью до подмножеств. Это объясняется вероятностным характером протекания БХП и очень часто невозможность измерения всех входных воздействий. При этом информация о поведении исследуемого объекта также носит неопределенный характер из-за отсутствия достаточного количества систематических и надежных данных. В итоге все это затрудняет использование известных методов построения математических моделей [16].

Между тем, для рассматриваемых объектов часто имеется разнообразная, хотя и не систематическая информация о качественном состоянии их среды, полученная различными службами в течение достаточно большого периода времени. Заметим при этом, что отдельные характеристики объекта, такого как, например, река с малым расходом воды, полученные различными службами (региональными, городскими или заводскими гидрохимическими лабораториями в течение ряда лет), порой отнесены к различным сечениям объекта; а некоторые из них недостаточно точны из-за несовершенства техники измерений.

Использование такой информации при моделировании стало возможно только с развитием теории нечетких множеств [30].

Описание методики. Представим модель, выбранную в качестве возможного «кандидата» для описания БХП, свойственных исследуемому объекту, в виде:

$$\Phi: X_0 \times P \times Z \times [0, T] \rightarrow Y, \quad (3.6)$$

где Φ – некоторый функциональный оператор, отображающий пространства всех начальных состояний объекта X_0 , параметров P и независимых входных переменных Z , реализованных на интервале времени $[0, T]$ в пространство выходных переменных Y .

Имеющуюся количественную и качественную информацию о поведении объекта представим следующим образом:

1 Детерминированные ограничения на выходные переменные модели

$$Y_i^* \leq Y_i \leq Y_i^{**}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3.7)$$

В результате ограничений (3.7) в пространстве реакций можно выделить гиперпараллелепипед $H = \{Y | (3.7)\}$, объем которого $V_n = (Y_1^{**} - Y_1^*) \cdot (Y_2^{**} - Y_2^*) \cdot \dots \cdot (Y_n^{**} - Y_n^*)$.

2 Функциональные ограничения

$$c_j^* \leq f_j(Y_1, Y_2, \dots, Y_{n_j}) \leq c_j^{**}, \quad j = \overline{1, k}, \quad (3.8)$$

где $f_j(\circ)$ – некоторые функции от Y_1, Y_2, \dots, Y_{n_j} , заданные в явном или неявном виде.

Обозначим через G подмножество выделенного гиперпараллелепипеда H , состоящее из значений Y , удовлетворяющих условию (3.8) $G = \{Y | (3.7), (3.8)\}$.

3 Нечеткие ограничения на выходные переменные

$$Y_i^* \leq \approx Y_i \leq \approx Y_i^{**}, \quad i = \overline{n+1, m}, \quad (3.9)$$

где символы $\leq \approx$ означают оператор размытия, переводящий четкое множество в приблизительно равное ему нечеткое. Согласно уравнению (3.9) значение Y_i должно находиться приблизительно в диапазоне $Y_i^* - Y_i^{**}$. Обозначим G' как подмножество значений G , удовлетворяющих ограничениям (3.9): $G' = \{Y | (3.7), (3.8), (3.9)\}$.

4 Нечеткие функциональные ограничения

$$c_j^* \leq \approx f_j(Y_1, Y_2, \dots, Y_{n_j}) \leq \approx c_j^{**}, \quad j = \overline{k+1, l'}. \quad (3.10)$$

Пространство значений G' , удовлетворяющих условию (3.10), образует пространство реакций Y .

Ограничения (3.9) и (3.10) важны в тех случаях, когда информация о поведении объекта имеет качественный характер. Отображение ее в количественную форму осуществим с помощью функций принадлежности $\mu_{\bar{Y}}(Y): Y \rightarrow [0, 1]$.

При линейной функции

$$\mu_{\bar{Y}_i}(Y_i) = (Y_i - Y_i^0)/(Y_i^1 - Y_i^0). \quad (3.11)$$

Функция (3.11) задается исследователем по точкам Y_i^0, Y_i^1 .

В случае экспоненциальной функции

$$\mu_{\bar{Y}_i}(Y_i) = a_i(1 - \exp(-\alpha_i(Y_i - Y_i^0)/(Y_i^1 - Y_i^0))), \quad (3.12)$$

где α_i – параметр формы кривой; a_i – значение Y_i , при котором $\mu_{\bar{Y}_i}(Y_i)$ равна a_i . Функция (3.12) задается по трем точкам $Y_i^0, Y_i^{0,5}, Y_i^1$.

Для гауссовой функции

$$\mu_{\bar{Y}_i}(Y_i) = \begin{cases} \left[1 - \alpha_i(Y_i - \hat{Y}_i)^2\right]^{-1} & \text{при } \alpha_i \geq 1, Y_i \leq \hat{Y}_i; \\ \left\{\exp\left[-\alpha_i(Y_i - \hat{Y}_i)^2\right]\right\}^2 & \text{при } \alpha_i \geq 1, Y_i \geq \hat{Y}_i; \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\mu_{\bar{Y}_i}(Y_i) = \exp\left[-\alpha_i(Y_i - \hat{Y}_i)^2\right] \quad \text{при } \alpha_i \geq 1, \forall Y_i, \quad (3.14)$$

где α_i – параметр формы кривой. Функции (3.13) и (3.14) задаются исследователем точкой, вблизи которой достигается наибольшее значение функции принадлежности $\mu_{\bar{Y}_i}(Y_i)$.

В случае S-образной функции

$$\mu_{\bar{Y}_i}(Y_i) = \begin{cases} 0 & \text{при } Y_i \leq \alpha_i; \\ 2(Y_i - \alpha_i)^2 / (\gamma_i \alpha_i)^2 & \text{при } \alpha_i \leq Y_i \leq \beta_i; \\ 1 - 2(Y_i - \gamma_i)^2 / (\gamma_i - \alpha_i)^2 & \text{при } \beta_i \leq Y_i \leq \gamma_i; \\ 1 & \text{при } Y_i \geq \gamma_i, \end{cases} \quad (3.15)$$

где $\beta_i = (\alpha_i + \gamma_i)/2$ – точка перехода ($\mu_{\bar{Y}_i}(Y_i) = 0,5$). Функция (3.15) задается исследователем степенью принадлежности в точках α_i, γ_i .

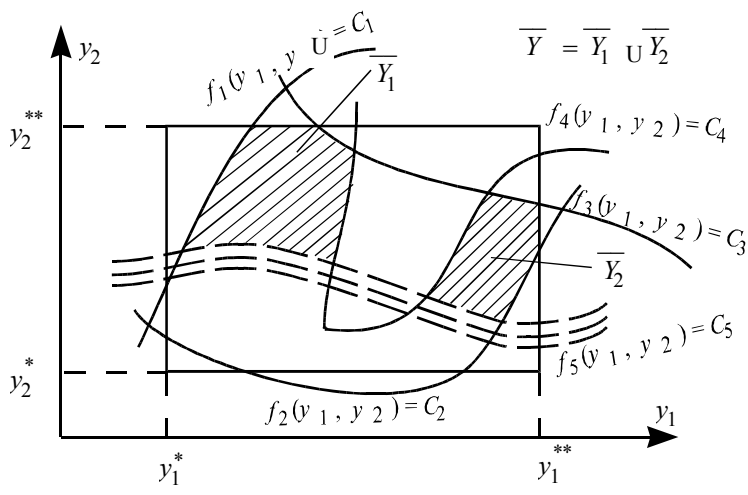
Возможные варианты определения областей «допустимых» реакций модели, т.е. реакций, удовлетворяющих ограничениям (3.7) – (3.10), приведены на рис. 3.3.

Основываясь на условии (3.6), выделим сочетания векторов (x_0, p, z) , где $x_0 \in \bar{X}, p \in \bar{P}, z \in \bar{Z}$. Каждому из них с помощью оператора Φ ставятся в соответствие значения $y \in \bar{Y}$ (см. рис. 3.4). Решение этой задачи важно в двух случаях – когда $\bar{X}_0, \bar{P}, \bar{Z}$ точно неизвестны и когда \bar{X}_0, \bar{Z} известны точно, но \bar{P} точно неизвестно. Хотя такая задача относится к классу обратных задач, ее можно решить прямым методом. Для этого установим «правдоподобные» границы пространств X_{0n}, P_n, Z_n (см. рис. 3.4) и будем наугад извлекать X_{0n}, P_n, Z_n сочетания x_{0n}, p_n, z_n . Из тех значений, которым с помощью оператора Φ ставится в соответствие $y \in \bar{Y}$, образуем пространство X_{0n}, P_n, Z_n , а неудачные сочетания будем отбрасывать.

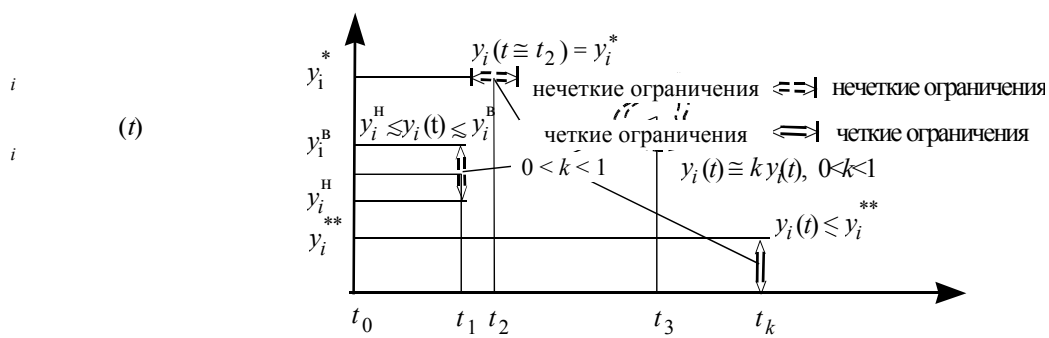
Итак, предложенная методика состоит в том, что пространство «допустимых» реакций \bar{Y} , сформированное из детерминированных и нечетких ограничений, с помощью обратного оператора Φ^{-1} отображается в пространство «правдоподобных» значений $D_n = X_{0n} \times P_n \times Z_n$ в отличие от традиционного подхода, в котором пространства «допустимых» значений входных переменных

$\bar{D} = \bar{X}_0 \times \bar{P} \times \bar{Z}$ и выходных реакций \bar{Y} известны точно и требуется определить оператор Φ . В принципе возможен случай, когда при длительном проведении испытаний модели и неоднократном расширении границ X_{0n}, P_n, Z_n не найдется ни одного сочетания векторов (x_{0n}, p_n, z_n) , отображаемого оператором Φ в \bar{Y} . Это означает, что Φ неадекватен моделируемому объекту. То же может быть и при испытаниях, в которых одно или несколько сочетаний (x_{0n}, p_n, z_n) отображается в \bar{Y} . При этом модель будет неустойчивой, так как в результате незначительных отклонений x_0, p, z значения вектора y выйдут из пространства его «допустимых» реакций. В подобных ситуациях необходима коррекция оператора Φ .

Реализация алгоритма испытаний модели серьезных затруднений не вызывает. Зная хотя бы приблизительно границы пространств X_{0n}, P_n, Z_n , с помощью датчиков случайных чисел можно сгенерировать x_{0n}, p_n, z_n .



a) a)



б) б)

Рис. 3.3 Возможные варианты определения областей «допустимых» реакций в случае статической (а) и динамической (б) модели

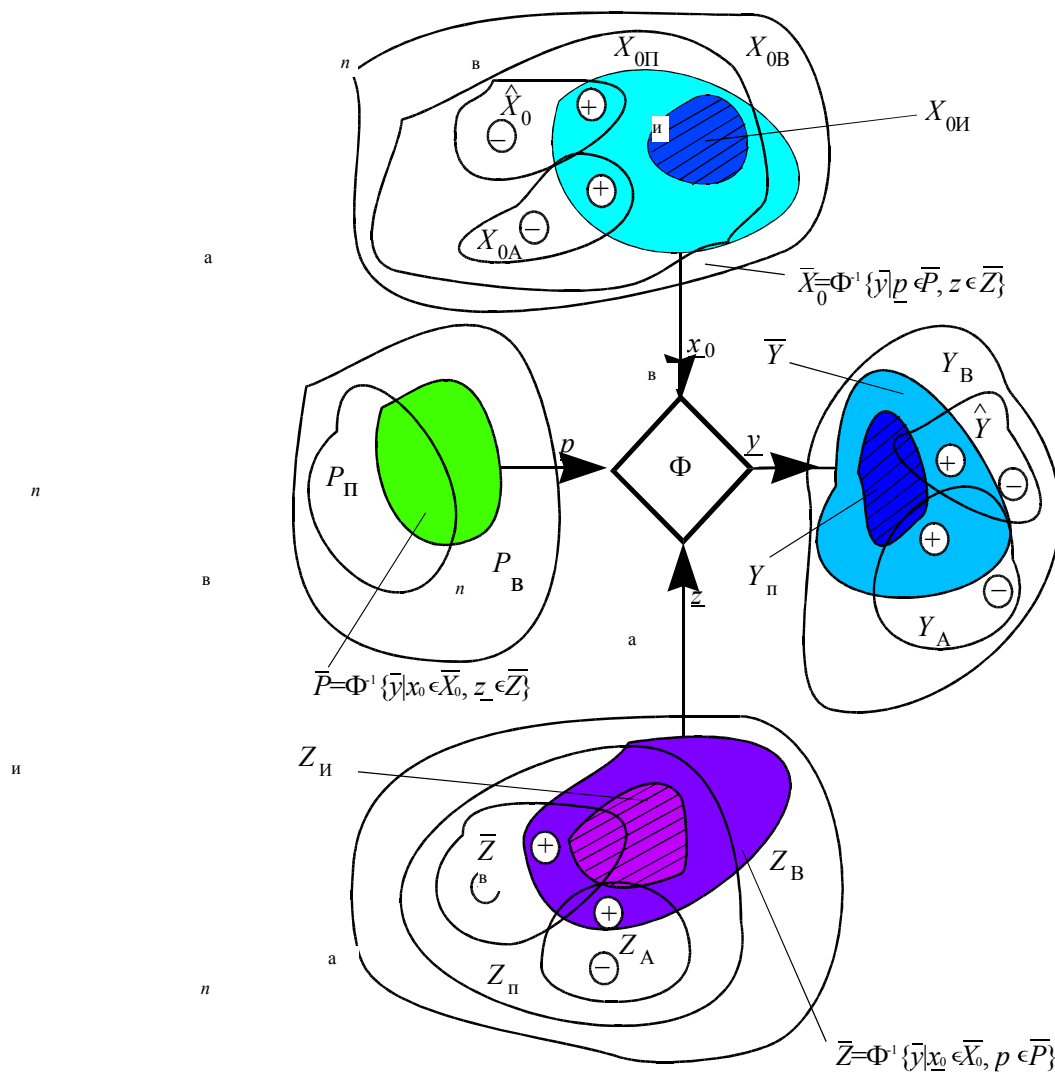


Рис. 3.4 Схема испытаний математической модели:

X_{0B}, P_B, Z_B – пространства возможных начальных состояний, параметров и входных переменных;
 $X_{0П}, P_П, Z$ – пространства выборочных значений векторов x, z, y , используемые при идентификации модели; $X_{0А}, Z_А$ – пространства, используемые при проверке адекватности модели; \hat{X}_0, \hat{Z} – пространства выборочных значений, используемые для прогноза

Решение уравнений с этими значениями позволяет проверить модель и условия выполнения ограничений. Так как в большинстве случаев плотность вероятности переменных $x_{0n} \in X_{0n}, p_n \in P_n, z_n \in Z_n$ неизвестна, то при проведении испытаний используется датчик равномерно распределенных последовательностей. В литературе он известен как ЛПτ [48]. Если же вид совместной плотности вероятности x_{0n}, p_n, z_n известен, то необходимо использовать датчики случайных чисел с конкретными значениями средних дисперсий и т.д.

В конечном итоге вид совместной плотности вероятности переменных x_0, p, z будет иным по сравнению с видом переменных x_{0n}, p_n, z_n . Это связано с тем, что в ходе проверки условия $y \in \bar{Y}$ нелинейный оператор Φ отфильтровывает «неудачные» их сочетания и, таким образом, изменяет известные вероятности этих переменных в X_{0n}, P_n, Z_n .

Достаточно точная оценка числа испытаний может быть получена с помощью интегральной теоремы Лапласа [19]:

$$p_r((\tilde{p} - \hat{p}) < \varepsilon) = \Phi \frac{\varepsilon \sqrt{\tilde{N}}}{\tilde{p}(1 - \tilde{p})} = \hat{\alpha}, \quad (3.16)$$

где \tilde{p} – вероятность события $y \in \bar{Y}$; \hat{p} – статическая оценка вероятности p_r ; ε – заданная точность; \tilde{N} – число испытаний; $\hat{\alpha}$ – надежность оценки. Значение $t_{\hat{\alpha}} = \frac{\varepsilon \sqrt{\tilde{N}}}{\tilde{p}(1-\tilde{p})}$ находится по таблице значений функции Лапласа [19]. Отсюда

$$\tilde{N} = \frac{t_{\hat{\alpha}}^2 \tilde{p}(1-\tilde{p})}{\varepsilon^2}. \quad (3.17)$$

Так как формула (3.17) справедлива при достаточно больших \tilde{N} , не слишком малых \tilde{p} и $(1-\tilde{p})$, не слишком больших $\tilde{p}-\hat{p}$, при которых [19]

$$\frac{|(\tilde{p}-\hat{p})(1-2\tilde{p})|}{3\tilde{N}\tilde{p}(1-\tilde{p})} \ll 1,$$

необходимо уже в ходе имитационных испытаний оценить значение \hat{p} .

Если математическая модель оказалась неадекватной пространству «допустимых» реакций, необходима ее коррекция. В этом случае проводят диагностику результатов статистических испытаний, которая состоит из следующих этапов: выявление компонент вектора $y^* \in Y$, нарушающих ограничения (3.7) – (3.10); выбор параметров модели $p \in P$, от которых зависит y^* ; оценка чувствительности y^* к параметрам p^* , а следовательно, к структуре включающих их выражений.

От каких именно параметров вектора p^* зависит поведение компонент вектора y^* , выясним на основе анализа корреляционной матрицы, элементы которой характеризуют тесноту линейной связи параметров с выходными переменными модели. Значения элементов матрицы получим, используя значения среднеквадратичных отклонений параметров и реакций модели [18], а также матриц ковариаций

$$K_{YP} = M \begin{bmatrix} \overset{\circ}{Y} & \overset{\circ}{P}^T \end{bmatrix}, \quad K_{PP} = M \begin{bmatrix} \overset{\circ}{P} & \overset{\circ}{P}^T \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

где $\overset{\circ}{Y}, \overset{\circ}{P}$ – центрированные значения векторов y, p , полученные в ходе статистических испытаний математической модели; M – символ математического ожидания; T – знак операции транспонирования.

Оценку матрицы чувствительности с наименьшей дисперсией можно также получить с помощью матриц ковариаций (3.18):

$$S_{YP} = K_{YP} K_{PP}^{-1}. \quad (3.19)$$

В зависимости от значений элементов этой матрицы можно прогнозировать смещение компонент вектора y^* в процентах от изменения p^* .

Простейший способ коррекции оператора Φ заключается в замене элементов модели, включающих параметры p , на другие, способные обеспечить достижение границ пространства \bar{Y} вектором y^* , не нарушая при этом естественных связей с другими модулями. Набор модулей гидродинамики, кинетики процессов БХП входит в состав подсистемы автоматизированного моделирования.

В конечном итоге создается математическая модель, адекватная исследуемому объекту, и на ее основе выполняются прогнозы БХП. Результаты прогнозов можно представить в виде условной плотности вероятности

$$\tilde{P}_r(\hat{Y} | x_0 \in \bar{X}_0, \bar{P}, z \in \bar{Z}),$$

где \hat{Y} – пространство прогнозируемых реакций модели, образуемое при известных x_0, z и множестве значений \bar{P} .

Среди достоинств предложенного подхода отметим: определение $\bar{X}_0, \bar{P}, \bar{Z}$, гарантирующих выполнение условия $y \in \bar{Y}$; отсутствие проблемы «некорректности» задачи параметрической идентификации при условии, если все пространство параметров \bar{P} используется в схеме организации прогнозов.

Рассмотрим использование описанной выше методики для исследования процессов биоокисления и нитрификации в аэротенке коридорного типа, осаждения суспензии в радиальном отстойнике, денитрификации в аппарате с перемешивающим устройством, а также процессов естественного самоочищения воды в реке.

3.2.1 Математическая модель аэротенка

Расширение и реконструкция производств на базе освоенных промышленных площадок – важнейшее направление развития химической промышленности. В связи с этим встают задачи расширения и реконструкции сооружений очистки сточных вод. Эти же задачи возникают в тех случаях, когда на крупное химическое предприятие возлагается задача приема на свои очистные сооружения сточных вод других предприятий или города в целом. Большинство действующих в настоящее время станций биохимической очистки сточных вод в своем составе имеют аэротенки коридорного типа.

Для создания математической модели процессов очистки сточных вод необходимо знание гидродинамической структуры потоков в сооружениях станции. В промышленных аэротенках коридорного типа с рассредоточенной подачей воды по длине коридора гидродинамика потоков суспензии занимает промежуточное положение между идеальным вытеснением и полным смешением [51]. В работах [3, 16] рассматривалась гидродинамическая структура потоков в виде совокупности ячеек полного смешения с байпасирующими и рециркулирующими потоками.

Один из способов определения гидродинамической структуры потоков – проведение трассерного эксперимента. Нами были проведены трассерные эксперименты радиоактивным индикатором йод-131 для ряда промышленных аэротенков. По характеру нормированных функций плотности распределения времени пребывания (ПРВП) для окислительных коридоров аэротенков можно выдвинуть две альтернативные гипотезы – гидродинамика потоков описывается:

- ячеечной моделью без обратных и байпасирующих потоков;
- ячеечной моделью с прямыми байпасирующими потоками и обратными рециркулирующими потоками.

Одним из способов их проверки является способ, заключающийся в следующем:

- проведение трассерного эксперимента либо в действующем аппарате, либо в аппарате с аналогичными конструктивными размерами и системой аэрации, расходом суспензии, близким к расходу сточных вод проектируемых химических производств;
- сравнение кривых вымывания трассерного вещества с теоретическими кривыми для каждой гипотезы и принятие той из них, для которой сумма квадратов отклонений расчетных значений концентраций трассерного вещества от реально измеренных имеет минимальное значение.

Для проверки первой гипотезы экспериментальная кривая функции вымывания трассерного вещества для i -го коридора аэротенка сравнивается с теоретической, аппроксимируемой функцией Эрланга [66]:

$$c_i(t, m_i) = \frac{M_i}{V_i} \frac{m_i}{(m_i - 1)!} \left(\frac{t}{\bar{t}_i} \right)^{m_i - 1} \exp\left(-m_i \frac{t}{\bar{t}_i} \right), \quad i = \overline{1, K}, \quad (3.20)$$

где $c_i(t, m_i)$ – концентрация трассерного вещества на выходе i -го коридора, мг/л; M_i – масса трассерного вещества, вводимого мгновенно в виде δ -импульса в начало i -го коридора, мг; V_i – объем i -го коридора, л; m_i – число ячеек полного смешения для i -го коридора; \bar{t}_i – среднее время пребывания частиц жидкости в i -м коридоре $\bar{t}_i = V_i / Q$, сут; Q – расход сточных вод л/сут; K – число коридоров в аэротенке.

Определение оптимального m_i для i -го коридора осуществим на основе решения задачи параметрической оптимизации:

$$\varphi_i = \arg \min \left\{ \sum_{r=1}^{N_i} \left(c_{i,r}^T(t_r, m_i) - c_{i,r}^3 \Big|_{Q=Q_1} \right)^2 \right\}, \quad i = \overline{1, K}, \quad (3.21)$$

где $c_{i,r}^T(t_r, m_i)$ – теоретические значения $c_i(t, m_i)$ в момент времени

t_r , мг/л; $c_{i,r}^3 \Big|_{Q=Q_1}$ – значения концентраций трассерного вещества на выходе из i -го коридора, полученные в ходе трассерного эксперимента при расходе сточных вод Q_1 , мг/л; N_i – число временных точек от момента запуска трассера.

При проверке второй гипотезы использован следующий алгоритм. Для i -го коридора аэротенка запишем систему уравнений материального баланса:

$$\begin{aligned} \frac{dc_{i,j}}{dt} &= \frac{m_i}{V_i} \left[R_{i,j-1} c_{i,j-1} + R_{i,j-(2+n_{\beta_i})} c_{i,j-(1+n_{\beta_i})} \beta_i + R_{i,j+(1+n_{\alpha_i})} c_{i,j-(1+n_{\alpha_i})} \alpha_i - \right. \\ &\quad \left. - (R_{i,j-1} \alpha_i + R_{i,j} + R_{i,j-1} \beta_i) c_{i,j} \right]; \\ \alpha_i &= \frac{R_{i,l}^\alpha}{R_{i,j}}; \quad \beta_i = \frac{R_{i,l}^\beta}{R_{i,j}}; \quad i = \overline{1, K}; \quad j = \overline{1, m_i}; \\ c_{i,l}, R_{i,l}, R_{i,j}^\alpha, R_{i,j}^\beta &= 0 \quad \text{при } l < 1, \quad l > m_i, \end{aligned} \quad (3.22)$$

где $c_{i,j}$ – концентрация трассерного вещества в j -й ячейке i -го коридора, мг/л; $R_{i,j}$ – объемные расходы в потоках, вытекающих из j -й ячейки и попадающих в $(j+1)$ -ю ячейку i -го коридора, л/сут; α_i – коэффициент межъячеечной рециркуляции потоков i -го коридора; $R_{i,j}^\alpha$ – объемные расходы в обратных рециркулирующих потоках из l -й в j -ю ячейку i -го коридора, л/сут; n_{α_i} – число ячеек i -го коридора, охваченных потоками межъячеечной рециркуляции; β_i – коэффициент байпасирования для i -го коридора; $R_{i,j}^\beta$ – объемные расходы в прямых байпасирующих потоках, следующих из l -й в j -ю ячейку i -го коридора, л/сут; n_{β_i} – число ячеек i -го коридора, охваченных байпасирующими потоками; l – вспомогательный индекс.

Объемные расходы $R_{i,j}$ получим из решения системы линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} R_{i,j} + R_{i,j-1}(\alpha_i + \beta_i - 1) - R_{i,j-(2+n_{\beta_i})} \beta_i - R_{i,j+n_{\alpha_i}} \alpha_i &= R_{i,j}^0, \\ i = \overline{1, K}, \quad j = \overline{1, m_i}, \end{aligned} \quad (3.23)$$

где $R_{i,j}^0$ – объемные расходы потоков сточных вод, поступающих в объем j -й ячейки i -го коридора через систему впускных регулируемых окон, л/сут.

Начальные условия для системы (3.22) были приняты в виде

$$c_{i,l} \Big|_{t=0} = \frac{M_i}{V_i} \delta(0), \quad c_{i,l} \Big|_{t=0} = 0, \quad l = \overline{2, m_i}, \quad i = \overline{1, K}. \quad (3.24)$$

Интегрирование системы (3.22) – (3.23) при определенных значениях $m_i, n_{\beta_i}, n_{\alpha_i}, \alpha_i, \beta_i$ осуществим методом Рунге-Кутты. Теоретическую кривую вымывания трассерного вещества запишем в виде

$$c_i(t, m_i) = c_{i, m_i}(t, m_i), t \geq 0, i = \overline{1, K}.$$

Оптимальные значения $m_i, n_{\beta_i}, n_{\alpha_i}, \alpha_i, \beta_i$ i -го коридора найдем в результате минимизации критерия (3.21), дополняя его ограничениями, полученными, исходя из условий физической реализуемости процессов в аэротенке:

$$0 \leq \beta_i \leq 1; \quad 0 \leq \alpha_i \leq 1; \quad m_i > 1; \quad 1 \leq n_{\beta_i} \leq (m_i - 2); \quad 1 \leq n_{\alpha_i} \leq (m_i - 2).$$

Специфика данной задачи состоит в том, что $m_i, n_{\beta_i}, n_{\alpha_i}$ – целые, а α_i, β_i – действительные числа. Для ее решения воспользуемся модифицированным комплекс-методом.

Очень часто трассерный эксперимент проводится не для каждого коридора отдельно – запуск трассерного вещества осуществляется в начало первого коридора, а его регистрация в конце 1-го, 2-го и так далее коридоров. Для такого случая оптимальные значения параметров теоретических кривых вымывания найдем в результате решения задачи

$$\begin{aligned} \varphi_{i \rightarrow i+1} = \arg \min \left\{ \sum_{r=1}^{N_{i \rightarrow i+1}} \left[\psi (c_{i,r}^T(t, m_i) - c_{i,r}^3 \Big|_{Q=Q_1})^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + (1 - \psi) (c_{i \rightarrow i+1,r}^T(t, m_i, m_{i+1}) - c_{i \rightarrow i+1,r}^3 \Big|_{Q=Q_1})^2 \right] \right\}, \end{aligned}$$

где ψ – весовой коэффициент.

На рис. 3.5 и 3.6 приведены примеры различных вариантов гидродинамической структуры потоков в аэротенке и кривых вымывания

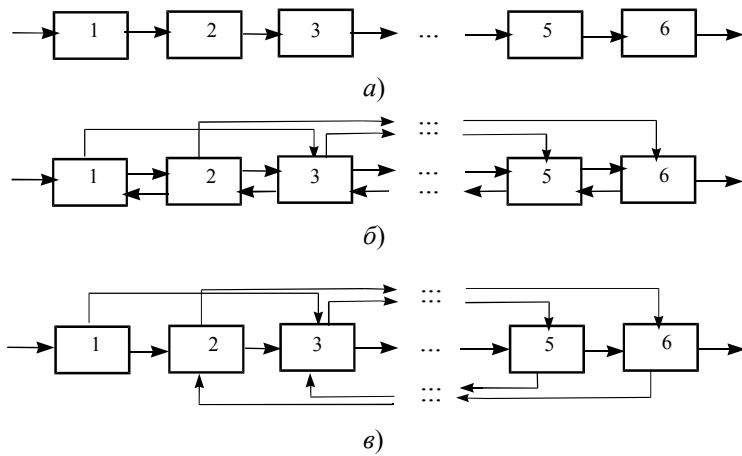


Рис. 3.5 Примеры гидродинамических структур потоков в аэротенке

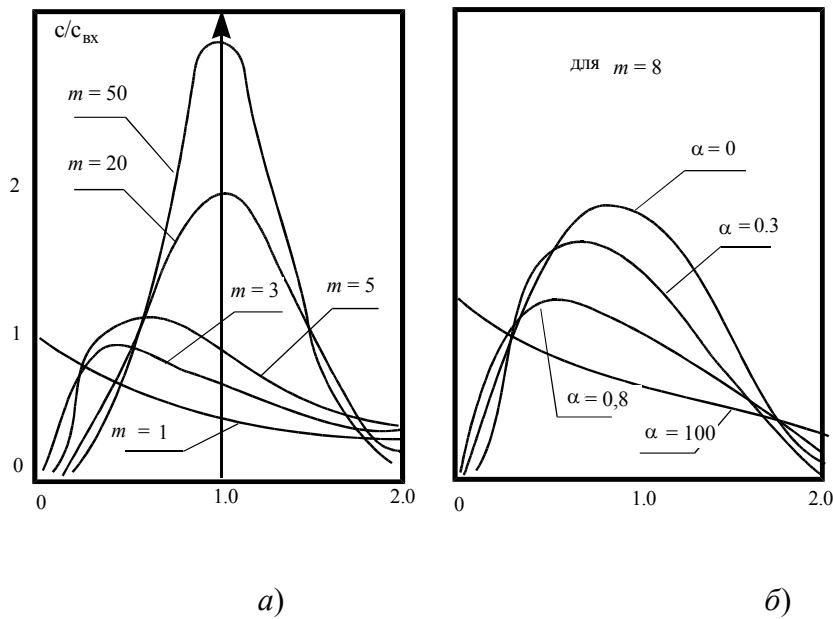


Рис. 3.6 Теоретические кривые вымывания для ячеечной модели без обратных и байпасирующих потоков (а) и ячеечной модели с обратными рециркулирующими потоками (б):

m – число ячеек; α – коэффициент межъячеечной рециркуляции

трассерного вещества. При построении зависимостей кривых вымывания были использованы результаты работы [16].

Известно, что при изменении расхода изменяется характер распределения времени пребывания частиц жидкости в объеме аппарата [2]. Поэтому, если трассерный эксперимент проводился при расходе сточных вод, отличном от расхода сточных вод проектируемых химических производств, а также в случае изменения расхода при проведении реконструкции действующей станции БХО, необходима коррекция гидродинамической структуры потоков в аэротенке при новом расходе Q_2 . С этой целью осуществим пересчет экспериментальных кривых вымывания трассерного вещества на новый расход, используя следующее соотношение [4]:

$$c_{i,r}^3 \Big|_{Q=Q_2} \left(\frac{Q_1 t}{Q_2} \right) = c_{i,r}^3 \Big|_{Q=Q_1} (t) \frac{Q_2}{Q_1}, \quad i = \overline{1, K}, \quad r = \overline{1, N_i}.$$

Следующим этапом моделирования процессов БХП является построение математических моделей процессов биохимических превращений, происходящих в аэротенке. В ряде работ [2, 5, 50] и др. показано, что в аэротенках происходят процессы аэробного окисления углерод- и азотсодержащих веществ. Окисление органического углерода осуществляется в результате метаболизма гетеротрофных микроорганизмов (ГМО) активного ила [7]. Окисление соединений азота производится двумя видами нитрифицирующих микроорганизмов (НМО): бактериями Nitrosomonas, окисляющими аммонифицированные азотистые соединения до нитритов; бактериями Nitrobacter., окисляющими нитриты до нитратов. Протекание процессов нитрификации в аэротенке связано с необходимостью сокращения количества неокисленных форм азота, поступающих в водоемы – приемники сточных вод и вызывающих значительное уменьшение содержания растворенного в воде кислорода [1]. Включение нитрификации в схему очистки предполагает в качестве следующей стадии процесс денитрификации, в которой происходит восстановление нитратов до азота.

В работах [35, 39] доказано, что для аэротенков коридорного типа математической моделью, наиболее полно описывающей процессы биохимических превращений, является модель, впервые предложенная авторами работы [57]. В связи с этим, в качестве конструктивной модели для проведения имитационных испытаний при решении задачи синтеза сооружений биохимической очистки сточных вод предлагаем модель следующего вида:

$$G(Y_{1,j}) - \frac{k_1 \left(\frac{Y_{1,j}}{Y_{3,j}} \right)^{k_7} Y_{3,j}}{k_2 + \left(\frac{Y_{1,j}}{Y_{3,j}} \right)^{k_7}} \frac{Y_{2,j}}{k_3 + Y_{2,j}} = 0; \quad (3.25)$$

$$G(Y_{2,j}) - k_6(Y_2^H - Y_{2,j}) - 1,42(1/k_5 - 1) \frac{k_1 \left(\frac{Y_{1,j}}{Y_{3,j}} \right)^{k_7} Y_{3,j}}{k_2 + \left(\frac{Y_{1,j}}{Y_{3,j}} \right)^{k_7}} \frac{Y_{2,j}}{k_3 + Y_{2,j}} = 0; \quad (3.26)$$

$$G(Y_{3,j}) - k_4 Y_{3,j} + k_5 \frac{k_1 \left(\frac{Y_{1,j}}{Y_{3,j}} \right)^{k_7} Y_{3,j}}{k_2 + \left(\frac{Y_{1,j}}{Y_{3,j}} \right)^{k_7}} \frac{Y_{2,j}}{k_3 + Y_{2,j}} = 0; \quad (3.27)$$

$$G(Y_{i,j}) = \left(\frac{1}{V_i} \right) \left[R_j^0 Y_{i,0} + R_{j-1} Y_{i,j-1} + R_{j-(2+n_\beta)} Y_{i,j-(2+n_\beta)} \beta_{j-(2+n_\beta)} + \right. \\ \left. + R_{j+n_\alpha} Y_{i,j+(1+n_\alpha)} \alpha_{j+(1+n_\alpha)} - (R_{j-1} \alpha_j + R_{j-1} \beta_j - R_j) Y_{i,j} \right], \quad (3.28)$$

$$i = \overline{1, 6}; \quad j = \overline{1, m}; \quad m = \sum_{k=1}^K m_k;$$

$$\beta_j = \tilde{\beta}_1, \quad j = \overline{1, m_1 - 2}; \quad \alpha_j = \tilde{\alpha}_1, \quad j = \overline{2, m_1}; \quad (3.29)$$

$$\beta_j = \tilde{\beta}_2, \quad j = \overline{m_1 + 1, m_1 + m_2 - 2}; \quad \alpha_j = \tilde{\alpha}_2, \quad j = \overline{m_1 + 2, m_1 + m_2}; \quad (3.30)$$

$$\dots$$

$$\beta_j = \tilde{\beta}_K, \quad j = \sum_{k=1}^{K-1} m_k + 1, \quad m - 2; \quad \alpha_j = \tilde{\alpha}_K, \quad j = \sum_{k=1}^{K-1} m_k + 2, \quad m; \quad (3.31)$$

$$k_1 = k_{1,20} \cdot 1,047^{T_1 - 20}; \quad (3.32)$$

$$k_8 = k_{8,20} \{ \exp(0,098(T_1 - 15)) \} (1 - 0,833(7,2 - pH)); \quad (3.33)$$

$$Y_2^H = 14,652 - 0,41022 \cdot T_1 + 0,00791 \cdot T_1^2 - 0,00007774 \cdot T_1^3, \quad (3.34)$$

где $Y_{1,j}, Y_{2,j}, Y_{3,j}$ – концентрация субстрата ГМО, растворенного кислорода и биомассы ГМО в объеме j -й ячейки, мг/л; k_1 – константа скорости роста ГМО, мг/л; k_2, k_3 – соответственно константы полунасыщения по субстрату и кислороду ГМО, мг/л; k_4 – коэффициент отмирания ГМО, 1/сут; k_5 – коэффициент эффективности для ГМО, мг/мг; k_6 – объемный коэффициент передачи по кислороду, 1/сут; k_7 – показатель степени; $G(Y_{i,j})$ – гидродинамическая составляющая изменения концентрации вещества в j -й ячейки, мг/(л · сут); R_j – объемный расход в потоке, поступающем из j -й ячейки в $j+1$ -ю ячейку, л/сут; V_j – объем j -й ячейки, л; m_k – число ячеек в k -м коридоре аэротенка; m – число ячеек в аэротенке; K – число коридоров в аэротенке; T_1 – температура, °С; Y_2^H – концентрация растворенного кислорода при насыщении, мг/л; $k_{1,20}, k_{8,20}$ – соответственно значения k_1 и k_8 при $T_1 = 20$ °С; $\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \tilde{\alpha}_3, \dots, \tilde{\alpha}_K; \tilde{\beta}_1, \tilde{\beta}_2, \tilde{\beta}_3, \dots, \tilde{\beta}_K$ – коэффициенты межъячеечной рециркуляции и байпасирования в коридорах аэротенка; n_α, n_β – соответственно число ячеек, охваченных потоками межъячеечной рециркуляции и байпасирования; R_j^0 – объемный расход сточных вод, поступающих в j -й ячейку через систему впускных регулируемых окон.

Следует отметить, что при принятии первой гипотезы о гидродинамической структуре потоков в аэротенке значения $\tilde{\alpha}_k, \tilde{\beta}_k, n_\alpha, n_\beta$ равны нулю.

В качестве альтернативных математических моделей БХП, входящих в список моделей, используемых в подсистеме автоматизированного моделирования, могут быть взяты модели, сравнительный анализ которых приведен в работе [5].

Наряду с методикой идентификации математической модели (3.25) – (3.34), предложенной в работе для нахождения кинетических констант, в ряде случаев может быть использована методика, апробированная в работе [38].

3.2.2 Математическая модель вторичного отстойника

Неотъемлемой частью сооружений биохимической очистки сточных вод являются отстойники (вторичные), предназначенные для отделения биомассы ила от очищенной воды. Механизм осаждения частиц ила во вторичном отстойнике достаточно сложен. На кинетику процесса осаждения влияют следующие факторы: размер и форма частиц, их концентрация, вязкость среды, гидродинамические особенности движения жидкости в аппарате и др. [5]. Следует также отметить, что седиментационные свойства ила во многом зависят от особенностей процессов, протекающих в аэротенке: концентрации растворенного кислорода, отношения биомассы ила и количества загрязнений [2], среднего времени пребывания частиц активного ила в подсистеме «аэротенк – вторичный отстойник» [64] (рис. 3.7).

Но в то же время и само осаждение влияет на течение процессов в аэротенке: концентрация ила в аэротенке зависит от степени уплотнения ила во вторичном отстойнике [2].

Для отделения ила от очищенной воды применяются отстойники различных типов: вертикальные, горизонтальные, радиальные [2]. Наибольшее распространение получили радиальные отстойники, поэтому при построении математической модели процесса осаждения в данной работе ограничимся рассмотрением отстойников этого типа.

При выборе математической модели в качестве перспективной для процесса осаждения активного ила в отстойнике должны быть учтены как конструктивные особенности аппарата, так и особенности гидродинамики потоков и кинетики осаждения суспензии в его объеме.

2

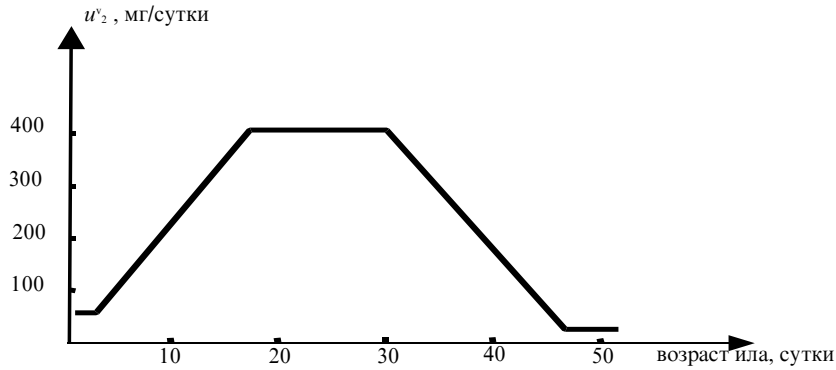


Рис. 3.7 Зависимость скорости осаждения ила в радиальном вторичном отстойнике

Анализ работ [2, 5, 52, 55] и других показал, что в большей степени перечисленным требованиям удовлетворяет математическая модель следующего вида:

$$k_1^v \frac{d^2 Y_1^v}{dr^2} - u_1^v(r) \frac{d Y_1^v}{dr} - \frac{u_2^v Y_1^v}{H^v} (1 - k_2^v) Y_1^v = 0; \quad (3.35)$$

$$u_{1,0}^v(r) (Y_{1,0}^v - Y_1^v) - k_1^v \frac{d Y_1^v}{dr} = 0 \quad \text{при} \quad r = \tilde{r}^v; \quad (3.36)$$

$$k_1^v \frac{d Y_1^v}{dr} = 0 \quad \text{при} \quad r = \bar{r}^v, \quad (3.37)$$

где Y_1^v , $Y_{1,0}^v$ – соответственно концентрации ила в отстойнике и во входном потоке, мг/л; $u_1^v(r)$ – скорость движения жидкости по радиусу отстойника, см/с; u_2^v – скорость осаждения частиц ила, см/с; $u_{1,0}^v(r)$ – скорость движения жидкости во входном потоке, см/с; r – текущий радиус отстойника, см; \bar{r}^v – радиус отстойника, см; \tilde{r}^v – радиус питающей трубы в отстойнике, см; H^v – высота отстойника, см; k_1^v – коэффициент продольной диффузии, см²/с; k_2^v – коэффициент, учитывающий эффект вымывания осадка из отстойника восходящим потоком воды (при $k_2^v > 1$ существует тенденция к вымыванию ила, при $k_2^v = 1$ сохраняется баланс между процессами осаждения и вымывания, при $0 < k_2^v < 1$ – тенденция к осаждению частиц ила, при $k_2^v = 0$ имеет место только процесс осаждения).

Уравнения (3.36) – (3.37) являются граничными условиями уравнения (3.35).

Скорость осаждения частиц ила, в свою очередь, является функцией от концентрации ила Y_1^v [2, 26]:

$$u_2^v = u_{2,0}^v \exp(-4,5 \cdot 10^{-4} Y_1^v), \quad (3.38)$$

где $u_{2,0}^v$ – начальная скорость осаждения ила, см/с.

Как было отмечено выше, скорость осаждения зависит от возраста ила. Примерный вид зависимости по результатам работ [2, 50] приведен на рис. 3.7. Не постоянна и скорость движения жидкости по радиусу отстойника, она изменяется в соответствии с выражением:

$$u_1^v(r) = \frac{R^v}{\pi \left(\bar{r}^v - r \right)^2}, \quad \bar{r}^v < r < \bar{r}^v, \quad (3.39)$$

где R^v – объемный расход входного потока сточных вод, поступающих в аэротенк.

Для определения k_1^v , k_2^v , наряду с подходом, описанным выше, можно воспользоваться методом, изложенным в работе [55].

Процессы биоокисления органических соединений в аэротенке и осаждения ила во вторичном отстойнике (3.35) – (3.39) объединим в подсистему, которая в литературе получила название «аэротенк – вторичный отстойник». Следует отметить, что часть активного ила из вторичного отстойника возвращается в аэротенк. Коэффициент рециркуляции ила определяется соотношением

$$p^{av} = \frac{R^{av}}{R_{вх}},$$

где p^{av} – коэффициент рециркуляции активного ила; R^{av} – объемный расход ила в рецикле; $R_{вх}$ – входной объемный расход сточных вод.

3.2.3 Математическая модель денитрификатора

Значительные концентрации соединений азота при сбросе сточных вод в водоемы-приемники способствуют усилению развития водорослей, могут быть токсичными для людей и оказать вредное воздействие на водную среду. Восстановление нитритов и нитратов протекает наиболее эффективно в процессе денитрификации сточных вод активным илом. Денитрифицирующие бактерии встречаются среди представителей родов *Pseudomonas* sp., *Acrobacterium* sp., *Micrococcus* sp. и др. [7, 63], которые, находясь в бескислородных условиях, используют для дыхания кислород, содержащийся в нитритах и нитратах вместо растворенного кислорода. Бактерии-денитрификаторы являются гетеротрофами и представляют группу факультативных анаэробов. Тот факт, что они присутствуют в сточных водах в большом количестве и могут использовать загрязненные вещества в качестве углеродного питания, значительно облегчает эксплуатацию сооружений, так как исключает необходимость выращивания специальной адаптированной микрофлоры [50].

Восстановление нитратов до азота представляет собой многоступенчатый процесс, протекающий по схеме:



В зависимости от рН-среды конечными продуктами могут быть либо NO , либо N_2O , либо N_2 . Так, по данным работы [50] при $\text{pH} < 7,3$ наиболее вероятно образование N_2O . Значение $\text{pH} = 7,5 \dots 8,0$ обеспечивает течение процесса денитрификации до N_2 [4]. Помимо рН на активность денитрификации влияют следующие факторы: источник органического углерода и его концентрация, содержание нитратов, концентрация кислорода, температура воды, присутствие токсичных веществ и др.

Вопросам математического описания процесса денитрификации активным илом посвящены работы [50, 54, 65]. Обычно для практических целей рекомендуется применять нулевой порядок реакции относительно концентрации нитратов. При очень низкой концентрации нитратов процесс денитрификации

описывается уравнением по типу кинетики Моно [65]. Однако зависимость Моно теоретически выведена и наиболее хорошо аппроксимирует экспериментальные данные, если биомасса активного ила однородна по составу, а субстрат представлен лишь одним чистым органическим веществом. Учет многокомпонентности состава сточных вод и гетерогенности популяций активного ила в большинстве случаев производится путем введения в кинетические зависимости поправочных степеней. На этой основе для станций биохимической очистки сточных вод рассмотрим следующую математическую модель процесса денитрификации аппарата проточного типа.

Математическое описание процесса для аппарата, схема которого приведена на рис. 3.8, представим в виде уравнений материального баланса в стационарном режиме, устанавливающих связь между ростом денитрификаторов активного ила и выведением органического субстрата при анаэробических условиях, предполагая при этом, что входной поток сточной воды не содержит бактерий, а фильтрат – хлопья активного ила:

$$\frac{R^d}{V^d}(Y_{1,0}^d - Y_1^d) = k_1^d \frac{\left(\frac{Y_1^d}{Y_3^d}\right)^{k_7^d} Y_3^d}{k_2^d + \left(\frac{Y_1^d}{Y_3^d}\right)^{k_7^d}}; \quad (3.40)$$

$$\frac{R^d}{V^d}(Y_{2,0}^d - Y_2^d) = k_6^d k_1^d \frac{\left(\frac{Y_1^d}{Y_3^d}\right)^{k_7^d} Y_3^d}{k_2^d + \left(\frac{Y_1^d}{Y_3^d}\right)^{k_7^d}}; \quad (3.41)$$

$$\frac{R^{dw}}{V^d} Y_3^d = k_5^d k_1^d \frac{\left(\frac{Y_1^d}{Y_3^d}\right)^{k_7^d} Y_3^d}{k_2^d + \left(\frac{Y_1^d}{Y_3^d}\right)^{k_7^d}} - k_4^d Y_3^d, \quad (3.42)$$

где R^d – входной поток сточной воды, л/сут; R^{dw} – расход отводимого ила, л/сут; V^d – объем аппарата, л; $Y_{1,0}^d, Y_1^d$ – соответственно концентрация ХПК на входе и на выходе аппарата, мг/л; $Y_{2,0}^d, Y_2^d$ – соответственно концентрация нитратов на входе и на выходе аппарата, мг/л; Y_3^d – концентрация денитрификаторов, мг/л; k_1^d – константа удельной скорости выведения ХПК, 1/сут; k_2^d – константа насыщения для выводимой ХПК; k_3^d – константа скорости поглощения кислорода в эндогенной респирации, 1/сут; k_4^d – константа смертности ила, 1/сут; k_5^d – коэффициент выхода ила при анаэробических условиях; k_6^d – количество кислорода, требуемого на единицу выведенной органики, мг кислорода/мг ХПК; k_7^d – показатель степени.

Отсутствие уравнений теплового баланса связано с тем, что процесс денитрификации протекает при изотермических условиях. Однако сезонные колебания температуры, солнечной радиации влияют на процесс денитрификации, в то время как незначительные суточные колебания, вызванные определенными технологическими режимами основных химических производств и погодными условиями гасятся на предшествующих стадиях биохимической очистки сточных вод. Предположительно, влияние температуры сказывается на росте биомассы и ее активности. Это влияние объясняется воздействием, во-первых, на структуру клеточных компонентов (белков, липидов) и, во-вторых, на температурные коэффициенты скоростей реакций, которые в свою очередь связаны с энергией активации [65].

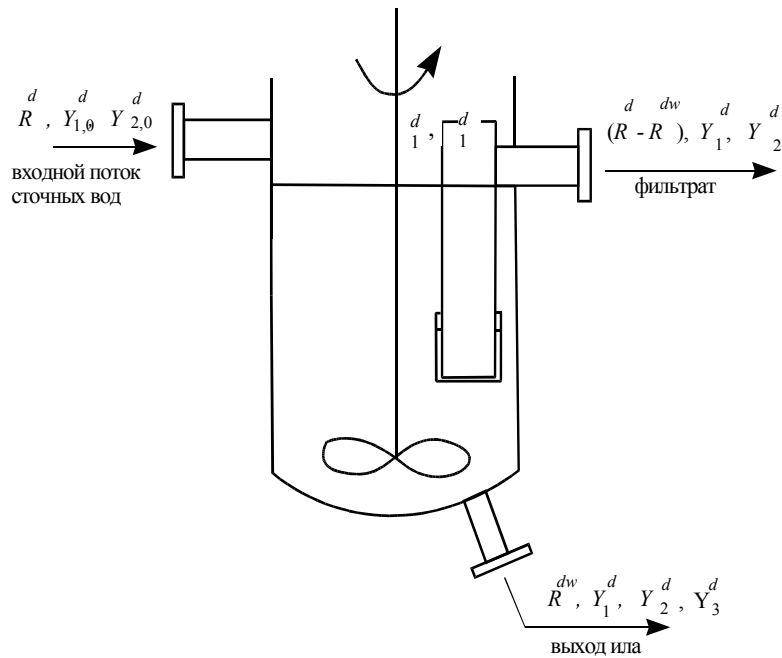


Рис. 3.8 Схема непрерывного процесса денитрификации в аппарате полного перемешивания

и в аппарате полного перемешивания

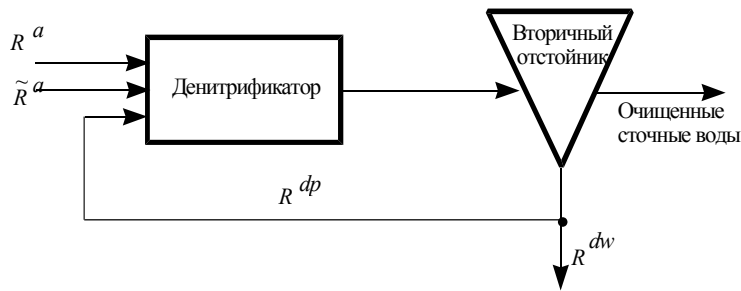


Рис. 3.9 Структурная схема подсистемы «денитрификатор – вторичный отстойник»

Обычно влияние окружающей среды на процесс денитрификации формализуется в виде корректирующей зависимости для величины удельной скорости выведения субстрата:

$$k_1^d = k_{1,20}^d \cdot 10^{0,04(T-20)}, \quad (3.43)$$

ГДЕ $k_{1,20}^d$ – ЗНАЧЕНИЕ k_1^d ПРИ $T = 20$ °С; T – ТЕМПЕРАТУРА СУСПЕНЗИИ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕНИТРИФИКАЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ПРИВЕДЕНО В РАЗДЕЛЕ 4.3.

Систему уравнений материального баланса для денитрификатора, входящего в подсистему «денитрификатор – вторичный отстойник», структурная схема которого приведена на рис. 3.9, являющегося фрагментом станции биохимической очистки сточных вод, запишем в виде:

$$\frac{dY_1^d}{dt} = \frac{\tilde{R}^a}{V^d} \tilde{Y}_{1,0}^a + \frac{R^a}{V^d} Y_{1,0}^a - k_1^d \frac{\left(\frac{Y_1^d}{Y_3^d}\right)^{k_7^d} Y_3^d}{k_2^d + \left(\frac{Y_1^d}{Y_3^d}\right)^{k_7^d}} - \frac{R^d}{V^d} Y_1^d, \quad (3.44)$$

$$\frac{dY_2^d}{dt} = \frac{R^a}{V^d} Y_{2,0}^a - \frac{R^d}{V^d} Y_2^d - k_6^d k_1^d \frac{\left(\frac{Y_1^d}{Y_3^d}\right)^{k_7^d} Y_3^d}{k_2^d + \left(\frac{Y_1^d}{Y_3^d}\right)^{k_7^d}} - k_3^d Y_3^d; \quad (3.45)$$

$$\frac{dY_3^d}{dt} = \frac{R^{dp}}{V^d} Y_3^{dp} - k_5^d k_1^d \frac{\left(\frac{Y_1^d}{Y_3^d}\right)^{k_7^d} Y_3^d}{k_2^d + \left(\frac{Y_1^d}{Y_3^d}\right)^{k_7^d}} - k_4^d Y_3^d - \frac{R^d}{V^d} Y_3^d - k_4^d Y_3^d. \quad (3.46)$$

Здесь, помимо ранее введенных обозначений $R^a, Y_{1,0}^a$ – соответственно объемный расход и ХПК сточных вод, поступающих из подсистемы «аэротенк – вторичный отстойник», л/сут и мг/л; $\tilde{R}^a, \tilde{Y}_{1,0}^a$ – соответственно объемный расход и ХПК сточных вод, поступающих в денитрификатор, минуя подсистему «аэротенк – вторичный отстойник», л/сут и мг/л; R^{dp}, Y_3^{dp} – соответственно объемный расход и концентрация денитрификаторов в рецикле, л/сут и мг/л; $Y_{2,0}^d$ – концентрация нитратов в сточных водах, поступающих в денитрификатор из подсистемы «аэротенк – вторичный отстойник», мг/л.

СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ (3.44) – (3.46), ДОПОЛНЕННАЯ УРАВНЕНИЯМИ, ОПИСЫВАЮЩИМИ ПРОЦЕСС ОСАЖДЕНИЯ ИЛА ВО ВТОРИЧНОМ ОТСТОЙНИКЕ, ОБРАЗУЕТ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ «ДЕНИТРИФИКАТОР – ВТОРИЧНЫЙ ОТСТОЙНИК».

3.2.4 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕКИ С МАЛЫМ РАСХОДОМ ВОДЫ

В отечественной и зарубежной литературе описано большое число математических моделей распространения примесей в водных потоках, учитывающих процессы аэробного окисления органических соединений, роста и отмирания планктона и т.п. [35, 53]. Все эти модели предназначены для исследования конкретных объектов. Применение их для других аналогичных объектов связано с серьезными трудностями, поскольку использование традиционных методов идентификации предполагает проведение большого числа экспериментов. К тому же большинство известных моделей относится к классу детерминированных, тогда как природные водоемы – термодинамически открытые системы, подверженные влиянию многочисленных неконтролируемых внешних воздействий, и процессы, протекающие в них, имеют вероятностный характер. Кроме того, векторы входных воздействий и выходных реакций имеют исключительно большую размерность. В итоге это осложняет использование известных моделей в конкретной ситуации.

Между тем для рассматриваемых объектов часто имеется разнообразная, хотя и не систематическая информация о качественном состоянии их водной среды. Однако отдельные показатели качества были определены для различных сечений объекта; некоторые из них недостаточно точны из-за несовершенства техники измерений. Использование такой информации при моделировании стало возможно только с развитием теории нечетких множеств [30].

Как было отмечено в разделе 3, наиболее сложными объектами при моделировании БХП на различных стадиях удаления загрязнений из сточных вод ПХП являются природные водоемы – приемники сточных вод. Чаще всего это реки разного народно-хозяйственного назначения [25].

При выборе структуры математической модели, используемой в качестве «кандидата» для проведения имитационных испытаний с помощью подсистемы автоматизированного моделирования для каждого предполагаемого водоема – приемника очищенных сточных вод ПТС, необходимо проведение анализа экспериментальных данных о состоянии его водной среды, полученных региональными, городскими, заводскими гидрохимическими лабораториями в течение ряда лет,

а также данных специальных полевых исследований с целью выявления протекания тех или иных БХП.

Для большинства речных потоков характерны следующие процессы [35, 53]: аэробного окисления органики, нитрификации, денитрификации, роста и отмирания планктона, реэрации воды кислородом воздуха, аммонификации белка и мочевины, ионного обмена, фотосинтеза, сорбции и другие. При математическом моделировании этих процессов установим связь между компонентами, среди которых в первую очередь выделим: концентрации растворенного кислорода, БПК₅, азота органических соединений, аммонийного и нитратного азота, фосфора, ионов тяжелых металлов (например, ионов шестивалентного хрома) и т.п. На рис. 3.10 приведена примерная схема взаимодействия основных процессов в реке с малым расходом воды.

Гидродинамическая структура потоков в реке чаще всего представляется моделью идеально-го вытеснения [35]. Однако для некоторых участков может быть предложена ячеечная модель [39]. Конкретный вид гидродинамической структуры определяется в ходе проведения трассерного эксперимента и решения задачи параметрической идентификации, аналогичной (3.21).

В результате анализа существующих типов моделей реки в качестве «кандидата» конструктивной модели предлагаем модель, в которой функциональные зависимости для отдельных процессов взяты из работы [53]:

$$\frac{dY_{1,i}^r}{dt} = -k_1^r Y_{1,i}^r \frac{Y_{5,i}^r}{k_{11}^r + Y_{5,i}^r} - k_3^r \frac{k_4^r}{k_4^r + Y_{5,i}^r} \frac{Y_{4,i}^r}{k_5^r + Y_{4,i}^r} + f_{1,i}^r; \quad (3.47)$$

$$\frac{dY_{2,i}^r}{dt} = -k_1^r Y_{2,i}^r \frac{Y_{5,i}^r}{k_{11}^r + Y_{5,i}^r} - k_3^r \frac{k_4^r}{k_4^r + Y_{5,i}^r} \frac{Y_{4,i}^r}{k_5^r + Y_{4,i}^r} + f_{2,i}^r; \quad (3.48)$$

$$\begin{aligned} \frac{dY_{3,i}^r}{dt} = & -k_1^r Y_{2,i}^r \frac{Y_{5,i}^r}{k_2^r + Y_{5,i}^r} - 0,075\xi_i \frac{Y_{3,i}^r}{Y_{3,i}^r + Y_{4,i}^r} + 0,075k_6^r \frac{Y_{5,i}^r}{k_7^r + Y_{5,i}^r} - \\ & - k_8^r Y_{3,i}^r \frac{Y_{5,i}^r}{k_9^r + Y_{5,i}^r} - k_{10}^r Y_{3,i}^r + k_3^r Y_{2,i}^r \frac{k_4^r}{k_4^r + Y_{5,i}^r} \frac{Y_{4,i}^r}{k_5^r + Y_{4,i}^r}; \end{aligned} \quad (3.49)$$

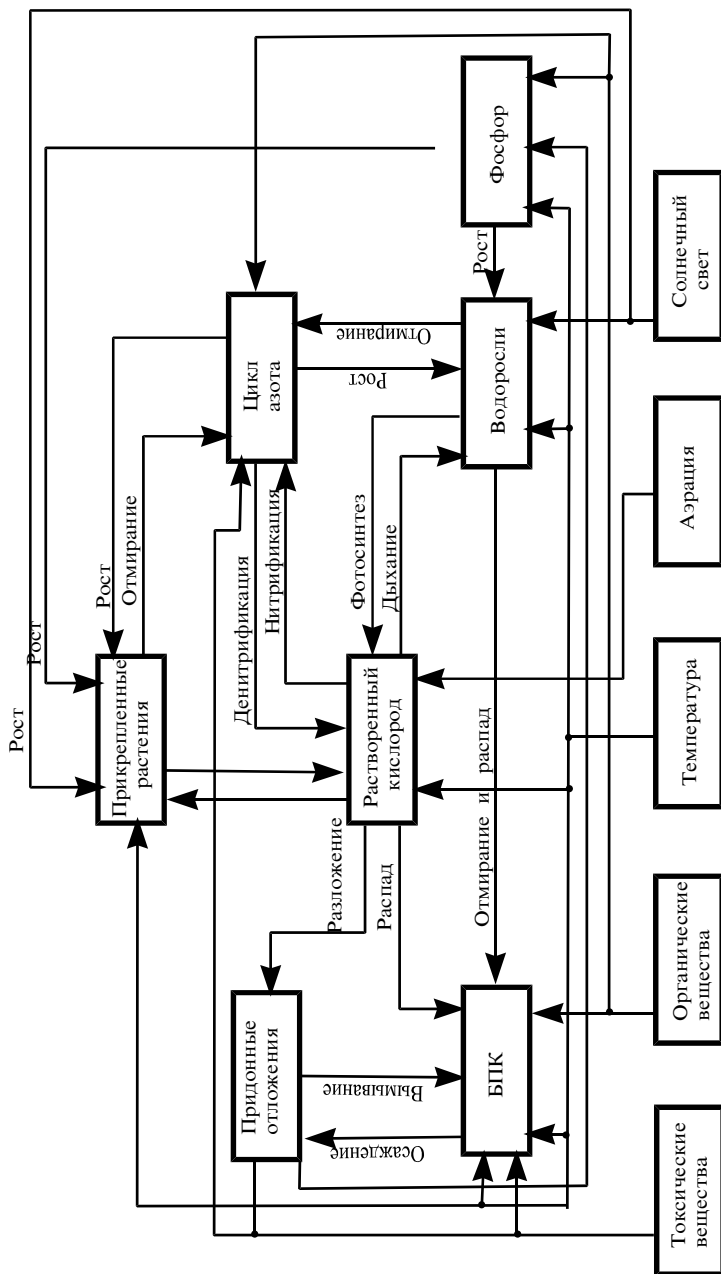


Рис. 3.10 Примерная схема взаимодействия основных компонент математической модели реки с малым расходом воды

$$\frac{dY_{4,i}^r}{dt} = k_8^r Y_{3,i}^r \frac{Y_{5,i}^r}{k_9^r + Y_{5,i}^r} - 0,075 \xi_i \frac{Y_{4,i}^r}{Y_{3,i}^r + Y_{4,i}^r} - 0,35 k_3^r Y_{1,i}^r \frac{k_4^r}{k_4^r + Y_{5,i}^r} \frac{Y_{4,i}^r}{k_5^r + Y_{4,i}^r}; \quad (3.50)$$

$$\frac{dY_{5,i}^r}{dt} = k_2^r (Y_{3,i}^r - Y_{5,i}^r) - k_1^r Y_{1,i}^r \frac{Y_{5,i}^r}{k_{11}^r + Y_{5,i}^r} - 4,57 Y_{3,i}^r \frac{Y_{5,i}^r}{k_9^r + Y_{5,i}^r} - 1,59 k_6^r \frac{Y_{5,i}^r}{k_7^r + Y_{5,i}^r} + (1,59 + 0,35 \frac{Y_{5,i}^r}{k_7^r + Y_{5,i}^r}) \xi_i; \quad (3.51)$$

$$\frac{dY_{6,i}^r}{dt} = k_{15}^r Y_{6,i}^r; \quad (3.52)$$

$$\frac{dY_{7,i}^r}{dt} = -k_{12}^r Y_{7,i}^r + 0,01 k_6^r \frac{Y_{5,i}^r}{k_7^r + Y_{5,i}^r} - 0,01 \xi_i; \quad (3.53)$$

$$\xi_i = \xi_m \frac{Y_{7,i}^r}{k_{13}^r + Y_{7,i}^r} \frac{Y_{3,i}^r + Y_{4,i}^r}{k_{14}^r + Y_{3,i}^r + Y_{4,i}^r} \frac{I_s}{I_{s,\max}} \exp\left(1 - \frac{I_s}{I_{s,\max}}\right) \frac{k_{16}^r}{k_{16}^r + Y_{6,i}^r}; \quad (3.54)$$

$$\xi_m = 0,02 \exp(0,17T); \quad (3.55)$$

$$I_s = I_{s,\max} \sin\left(\frac{\pi(t_c - t_d) \text{one}(t_c - t_d) \text{one}(t_d + \lambda - t_c)}{\lambda}\right); \quad (3.56)$$

$$Y_{5,i}^{r,H} = 14,652 - 0,41T + 0,007991T^2 - 0,00007774T^3; \quad (3.57)$$

$$t_c = 24(t - \text{int}(t)); \quad (3.58)$$

$$f_{1,i}^r = l_{1,i}^r (\text{one}(t - t_{1,i}) - \text{one}(t - t_{2,i})); \quad (3.59)$$

$$f_{2,i}^r = l_{22,i}^r (\text{one}(t - t_{1,i}) - \text{one}(t - t_{2,i})); \quad (3.60)$$

$$\begin{aligned} Y_{1,i}^r(t=0) = Y_{1,i0}^r, Y_{2,i}^r(t=0) = Y_{2,i0}^r, Y_{3,i}^r(t=0) = Y_{3,i0}^r, Y_{4,i}^r(t=0) = Y_{4,i0}^r, \\ Y_{5,i}^r(t=0) = Y_{5,i0}^r, Y_{6,i}^r(t=0) = Y_{6,i0}^r, Y_{7,i}^r(t=0) = Y_{7,i0}^r, \quad i = 1, m^r. \end{aligned} \quad (3.61)$$

Здесь $Y_{1,i}^r$ – концентрация БПК, мг/л; $Y_{2,i}^r$ – концентрация азота органических соединений, мг/л; $Y_{3,i}^r$ – концентрация аммонийного азота, мг/л; $Y_{4,i}^r$ – концентрация нитратного азота, мг/л; $Y_{5,i}^r$ – концентрация растворенного кислорода, мг/л; $Y_{6,i}^r$ – концентрация ионов шестивалентного хрома, мг/л; $Y_{7,i}^r$ – концентрация общего фосфора, мг/л; ξ_i – скорость роста фитопланктона, мг сухого вещества фитопланктона/(л · сут); $Y_{5,i}^{r,H}$ – концентрация насыщения растворенного кислорода, мг/л; k_1^r – константа скорости аэробного разложения примесей, 1/сут; k_2^r – коэффициент реаэрации, 1/сут; k_3^r – константа скорости денитрификации, 1/сут; k_4^r – константа лимитирования скорости денитрификации концентрацией растворенного в воде кислорода, мг O_2 /л; k_5^r – константа насыщения по нитратам, мг $NO - NO_3^-$ /л; k_6^r – константа скорости отмирания фитопланктона, мг/(л · сут); k_7^r – константа лимитирования скорости отмирания фитопланктона концентрацией растворенного кислорода, мг O_2 /л; k_8^r – константа скорости нитрификации, 1/сут; k_9^r – константа лимитирования скорости нитрификации концентрацией растворенного кислорода, мг O_2 /л; k_{10}^r – константа скорости ионного обмена, 1/сут; k_{11}^r – константа лимитирования скорости аммонификации концентрацией растворенного кислорода, мг O_2 /л; k_{12}^r – константа скорости потребления фосфора, 1/сут; k_{13}^r – константа лимитирования роста фитопланктона концентрацией фосфора, мг/л; k_{14}^r – константа лимитирования скорости роста фитопланктона концентрацией аммонийного азота, мг/л; k_{15}^r – константа скорости поглощения ионов тяжелых металлов, 1/сут; k_{16}^r – константа ингибирования скорости роста фитопланктона концентрацией ионов шестивалентного хрома, мг/л; $I_{s,\max}, I_s$ – максимальное и текущее в данной местности, в данный период времени года значение интенсивности солнечной радиации, лм/сут; $\text{int}(\circ), \text{one}(\circ)$ – соответственно, функция целой части числа и единичная функция; t_d, λ – соответственно, время восхода и продолжительность светового дня, ч; ξ_m – максимум скорости роста фитопланктона, мг сухого вещества фитопланктона/(л · сут); t – время, сут; T – температура воды, °С; t_c – световое время суток, ч; $l_{1,i}$ – скорость поступления органических веществ с берега, мг/(л · сут); $l_{2,i}$ – скорость поступления азота органических веществ с берега, мг/(л · сут); $t_{1,i}, t_{2,i}$ – время, в течение которого происходит смыв органики с полей, сут; i – номер участка реки;

$Y_{1,i0}^r, \dots, Y_{7,i0}^r$ – начальные условия для $Y_{1,i}^r, \dots, Y_{7,i}^r$ на i -м участке реки, мг/л; m^r – число участков с относительно постоянными гидрохимическими параметрами.

Значения стехиометрических коэффициентов взяты из литературы [44]: 0,075 – количество азота в мг, содержащееся в 1 кг сухого веса растений; 0,35 – коэффициент эквивалентного превращения кислорода в нитритный азот; 1,59 – количество кислорода в мг, содержащееся в 1 кг сухого веса растений (высвобождение азота растений предполагается в аммонийной форме); 4,57 – количество кислорода в мг, потребляемое при аэробном окислении 1 мг аммонийного азота; 0,01 – количество фосфора, содержащееся в 1 мг сухого веса фитопланктона; 0,02 – значение ξ_m при 20 °С.

Если в исследуемом водоеме отсутствуют те или иные процессы, то соответствующие составляющие, описывающие данные процессы в математической модели (3.47) – (3.61) должны быть исключены из нее.

Результаты исследования процессов самоочищения реки Цны приведены в разделе 4.5.

3.3 Алгоритм решения задачи реконструкции станции биохимической очистки сточных вод

Как было отмечено выше, существующие методики решения задачи реконструкции станций БХО в ряде случаев приводят к тому, что станции, выполненные по этим проектам, работают неэффективно. Поэтому наиболее перспективным путем решения задачи, по нашему мнению, является разработка и использование эвристических алгоритмов, максимально учитывающих специфику задачи и позволяющих при допустимых затратах времени и средств находить приемлемое проектное решение. Схема взаимосвязей отдельных подзадач, решаемых при реконструкции станции БХО сточных вод приведена в разделе 1. Совместное использование алгоритмов их решения позволит получить вариант проекта реконструкции сооружений БХО, реализация которого с заданной вероятностью обеспечит сохранность окружающей среды.

В начальной фазе решения задачи на основе усредненных значений вектора входных характеристик сточных вод $\bar{X}_{вх}^u$ и результатов лабораторных исследований сформируем множество вариантов структурных схем станции (см. раздел 2.2.2). Элементами $\bar{X}_{вх}^u$ являются:

$$\bar{X}_{вх}^u = (R_0^u, T^u, pH^u, Y_{1,0}^u, Y_{4,0}^u, Y_{7,0}^u),$$

где R_0^u – объемный расход сточных вод; T^u – температура; pH^u – реакция среды; $Y_{1,0}^u$ – концентрация субстрата, потребляемого ГМО; $Y_{4,0}^u$ – концентрация субстрата, потребляемого НМО; $Y_{7,0}^u$ – концентрация вещества, ингибирующего рост микроорганизмов.

Далее для выбранного в ходе решения задачи Z_{1v} варианта структурной схемы производится расчет аппаратного оформления всех стадий очистки сточных вод по эмпирическим зависимостям, заложенным в СНиП 2.04.03–85 [46] (эти зависимости в работе не приводятся). Результатом расчетов являются значения рабочих объемов аппаратов для каждого технологического процесса БХО. На их основе и данных из каталога типовых проектов формируем множество вариантов аппаратного оформления (определяем конструктивные размеры и число аппаратов) станции БХО (см. раздел 2.2.3). В табл. 3.1 в качестве примера приведены основные размеры некоторых типовых аэротенков-смесителей [20].

Заключительным шагом данной фазы является ранжирование вариантов аппаратного оформления по возрастанию критерия F^2 (2.12). Следует отметить, что среди множества вариантов многие имеют близкие друг к другу значения затрат на капитальное строительство и эксплуатацию, но в то же время обеспечивают разную степень очистки при ее оценке по более точным математическим моделям. Это объясняется различными особенностями: гидродинамических структур потоков в основных аппаратах и сооружениях станции, кинетических закономерностей, а также несовершенством существующих методов расчета.

Вторая фаза решения задачи реконструкции станции БХО связана с исследованием множества вариантов аппаратного оформления, для которого выполняется условие (2.14). Методика исследования реализуется в подсистеме автоматизированного моделирования (см. рис. 3.2), основные этапы которой

изложены в разделе 3.2. Здесь же рассмотрим методы, с помощью которых можно выполнить: идентификацию математических моделей БХП и прогнозирование качества сточных вод на выходе типового варианта структуры технологической схемы станции БХО, а также в контрольном створе водоема-приемника (реки).

3.1 Основные параметры типовых аэротенков-смесителей

№ п/п	Номер типового проекта	Ширина коридора, м	Рабочая глубина, м	Число коридоров	Рабочий объем секции, м ³	Длина секции, м
1	902-2-94	3	1,2	2	170	24
2	902-2-95/96	3	1,2	2	260	36
3	902-2-215/216	4	4,5	2	864	24
4	902-2-217/218	5	4,5	2	1296	36
5	902-2-268	6	5	3	3780	42
6	902-2-269	6	5	3	5400	60
7	902-2-211	6	5	3	7560	84
8	902-2-120/72	9	5,2	4	21 680	120
9	902-2-264	9	5,2	4	28 070	150

Для выполнения прогнозов необходимо знание гидродинамической структуры потоков и кинетических закономерностей БХП в аппаратах станции. Определение гидродинамической структуры в аэротенке осуществляется в ходе решения задач (3.20 – 3.21) и/или (3.22 – 3.31). При решении первой из них используется метод полного перебора числа ячеек m_i в интервале $[1, m_i^b]$, где m_i^b – максимальное число ячеек для ячеечной модели без обратных и байпасирующих потоков i -го коридора аэротенка. Исходными данными для задачи являются результаты трассерных экспериментов, проведенных для каждого типового аэротенка и хранящихся во внешней памяти ПЭВМ.

Задача (3.22) – (3.31) является более сложной. Это объясняется тем, что одна часть независимых переменных $(m_i, n_{\beta_i}, n_{\alpha_i})$ принимает только целые значения, другая (α_i, β_i) – действительные. В связи с этим в основу алгоритма ее решения положен модифицированный комплекс-метод. Окончание решения определяется достижением заданного значения среднеквадратичной относительной ошибки. При этом, значения объемных расходов в потоках для каждой ячейки определяются в результате решения системы алгебраических уравнений (3.23) методом Гаусса. Решение системы дифференциальных уравнений (3.22), (3.24) выполняется методом Рунге-Кутты 4-го порядка с автоматическим выбором шага. Укрупненная блок-схема алгоритма определения гидродинамической структуры потоков в аэротенке приведена на рис. 3.11.

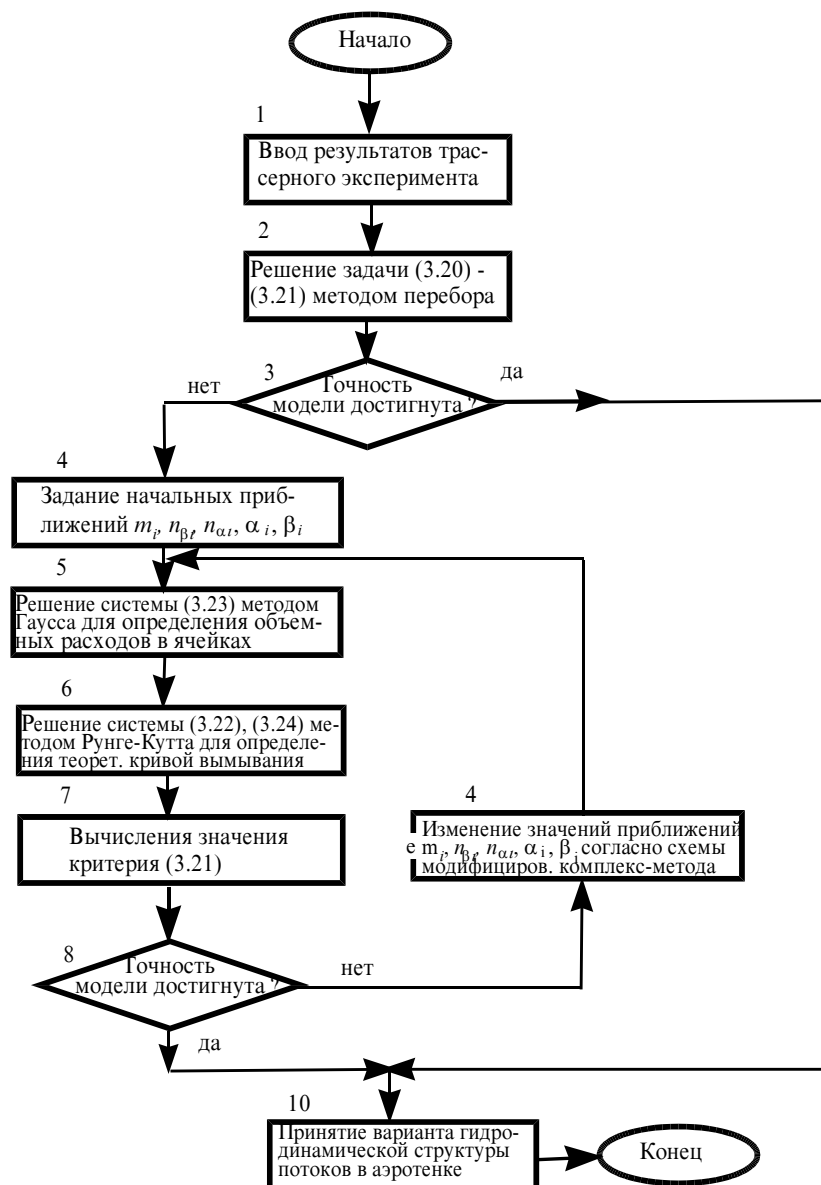


Рис. 3.11 Укрупненная блок-схема алгоритма определения гидродинамической структуры потоков в аэротенке

В связи с выполнением значительного объема вычислений на ПЭВМ при решении задачи реконструкции станции БХО предпочтение следует отдавать простой структуре, так как в этом случае более простой вид имеет система уравнений (3.25 – 3.34), описывающая кинетические закономерности процессов биоокисления органических соединений ГМО и НМО. Поэтому, если при проверке первой гипотезы значение среднеквадратичной относительной ошибки меньше заданной, то проверку второй гипотезы можно не проводить.

Определение кинетических закономерностей БХП в исследуемом аэротенке при наличии информации об особенностях очистки конкретных ПТС осуществляется с помощью системы автоматизированного моделирования. В качестве такой информации служат данные наблюдений за работой действующей станции БХО, очищающей сточные воды аналогичного состава, в течение достаточно большого промежутка времени. В противном случае кинетические константы модели могут быть найдены в ходе активного эксперимента на лабораторной установке, используя методологию работы [39].

При идентификации модели для решения системы уравнений (3.25) – (3.34) использован метод Ньютона.

Для описания процесса осаждения частиц ила во вторичном отстойнике использована модель (3.35 – 3.37). При ее идентификации в подсистеме автоматизированного моделирования для решения дифференциального уравнения (3.35) с граничными условиями (3.36 – 3.37) использован метод конечных разностей, позволяющий свести решение уравнения к системе линейных алгебраических уравнений, которая решается методом Гаусса.

Аналогичные методы и алгоритмы могут быть использованы и для описания подсистемы «денитрификатор – вторичный отстойник».

Достижение наилучших показателей качества сточных вод на выходе станции БХО (минимальных значений концентраций вредных веществ) для каждого варианта аппаратного оформления можно получить, решая задачу оптимизации технологических параметров БХП. Для подсистемы «аэротенк – вторичный отстойник» управляющими переменными являются: коэффициент рециркуляции, равный отношению расхода ила в рецикле к общему расходу сточных вод; коэффициент распределения входного потока по коридорам аэротенка; расходы воздуха на аэрацию в каждом коридоре аэротенка; коэффициент регенерации ила, равный отношению длины зоны, отведенной под регенератор активного ила, к суммарной длине всех коридоров аэротенка. Анализ, выполненный в работе [39], показал, что для данной подсистемы наиболее важными из них являются: коэффициент рециркуляции и расход воздуха на аэрацию.

В качестве обобщенного показателя качества предлагается использовать величину:

$$F^{2'} = \frac{\text{БПК}_5}{\text{БПК}_5^{\text{lim}}} + \frac{Y_{4,m}}{Y_{4,m}^{\text{lim}}}, \quad (3.62)$$

где БПК_5 и $\text{БПК}_5^{\text{lim}}$ – соответственно значение биохимической потребности в кислороде в контрольном створе водоема-приемника и ее предельно допустимое значение; $Y_{4,m}$ и $Y_{4,m}^{\text{lim}}$ – соответственно значение концентрации субстрата НМО на выходе аэротенка и значение ПДК. Связь между БПК_5 , $Y_{1,m}$ и $Y_{1,\text{ВЫХ}}^{\text{V}}$ устанавливается с помощью зависимости:

$$\text{БПК}_5 = k_1^{\text{av}} Y_{1,m} + k_2^{\text{av}} Y_{1,\text{ВЫХ}}^{\text{V}}, \quad (3.63)$$

где k_1^{av} , k_2^{av} – коэффициенты, определяемые путем усреднения данных лабораторных анализов для сточных вод конкретных ПТС; $Y_{1,m}$ – концентрация субстрата ГМО на выходе аэротенка; $Y_{1,\text{ВЫХ}}^{\text{V}}$ – концентрация ила на выходе вторичного отстойника.

Расход воздуха на аэрацию связан с коэффициентом k_6 системы уравнений (3.25) – (3.34) различными соотношениями, одно из которых имеет вид:

$$k_{6,i} = 0,041 [Rb_i(l_i - d_i)] \frac{1}{d'} \frac{h'}{h_i} \left(\frac{f_p'}{d_i'} \right)^{0,18} \left(\frac{h_p'}{d_p'} \right)^{-0,33}, \quad (3.64)$$

где Rb_i – расход воздуха на аэрацию в i -м коридоре аэротенка; l_i , d_i , h_i – соответственно длина, ширина и глубина i -го коридора аэротенка; d_p' – средний диаметр пузыря воздуха; f_p' , h_p' – соответственно ширина полосы и глубина зоны аэрации в i -м коридоре аэротенка.

Для нахождения оптимальных значений коэффициента рециркуляции и расхода воздуха на аэрацию для варианта станции, оптимального с точки зрения проектировщика, применим симплекс-метод. Эффективность данных управляющих переменных при решении задачи оптимального управления работой станции БХО рассмотрена в разделе 3.5.

Основным управляющим воздействием при определении минимальных значений концентрации нитратов в подсистеме «денитрификатор – вторичный отстойник» является коэффициент рециркуляции активного ила.

При исследовании процессов самоочищения в водоеме-приемнике (реке) для решения системы уравнений (3.47) – (3.61) использован метод Рунге-Кутты 4-го порядка с автоматическим выбором шага.

Исследование варианта аппаратного оформления станции БХО, включающей аэробные и анаэробные БХП, осуществляется последовательно, например: подсистема «аэротенк – вторичный отстойник», подсистема «денитрификатор – вторичный отстойник» и водоем – приемник очищенных сточных вод. При этом значения переменных на выходе одной подсистемы являются входными для следующей.

В разделе 4.2 приведены результаты решения задачи реконструкции станции БХО.

3.4 Разработка системы аварийной защиты и управления станцией биохимической очистки сточных вод

Процесс биоокисления, используемый на станциях биохимической очистки сточных вод (БХО), требует строго соблюдения технологического режима, поскольку он чувствителен к изменению температуры и рН-среды, ингибирующему действию органических и неорганических соединений. При появлении в стоках высоких концентраций этих веществ требуется их разбавление. Нормальную работу комплекса БХО сложно обеспечить ввиду отсутствия стабильности состава и уровня концентраций веществ в сточной воде, нестационарного расхода стоков и сезонных колебаний температуры окружающей среды. Более того, в практике работы очистных сооружений типичны примеры внезапного появления «залповых» сбросов вредных веществ с промышленных предприятий и резкого увеличения гидравлической нагрузки, возникающей в результате выпадения ливневых дождей. В первом случае это приводит к частичному или полному отравлению микроорганизмов, возникновению у них «шокового» состояния и, окончательно, к «срыву» процесса очистки в результате вымывания биологической культуры из аппаратов станции. Во втором случае повышенный расход воды способен полностью вымыть микроорганизмы активного ила из системы. При этом, сточные воды, содержащие высококонцентрированные примеси, не подвергаясь биообработке, поступают в искусственные или естественные водоемы, отравляют в них флору и фауну, загрязняют водную среду и способствуют возникновению эпидемий.

За последние десятилетия в России и за рубежом начали развиваться автоматизированные системы управления технологией очистки сточных вод. Наряду с развитием технического обеспечения (микропроцессоров, контрольно-измерительных приборов и т.д.) интенсивно развивается математическое обеспечение АСУ ТП, основанное на современной теории управления [51, 60] и др. Однако в большинстве работ решаются задачи стабилизации режима очистки, но при этом вопросы оптимального выбора заданий локальным системам регулирования процессом биохимических превращений остаются открытыми. Следует также отметить, что в существующих системах управления станциями БХО не заложены принципиальные возможности компенсации возмущений, ведущих к серьезному нарушению режима биохимической очистки.

Предлагаемая в данной работе система автоматической аварийной защиты и управления станцией БХО обладает следующими функциями [36]:

- прогноз аварийных ситуаций на станциях БХО;
- упреждение аномальных ситуаций в подсистеме «аэротенк – вторичный отстойник»;
- стабилизация режима работы станции в период действия аварийных возмущений;
- переход к режиму ее нормальной эксплуатации после снятия указанных возмущений.

Решение первой задачи возможно на основе математической модели подсистемы «аэротенк – вторичный отстойник», описанной в работе [42]. При этом опережение информации в системе автоматической защиты станции БХО достигается за счет выноса датчиков расхода и качества воды в колодцы канализационного коллектора.

При появлении в реальной системе гидравлических и концентрационных возмущений необходимо «блокировать» возможность срыва процесса БХО с помощью управляющих воздействий, значения которых находятся в результате решения следующей задачи оптимального управления статическими режимами работы станции.

Задача А-1. Найти оптимальные значения управляющих воздействий станции БХО p^*, u^* , при которых векторная целевая функция

$$F = f(Y_1, Y_4) \quad (3.65)$$

ПРИНИМАЕТ ОПТИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ И ПРИ ЭТОМ УДОВЛЕТВОРЯЮТСЯ ОГРАНИЧЕНИЯ:

а) на соотношение определяющих параметров гидродинамического и биохимического режимов очистки сточных вод в подсистеме «аэротенк – вторичный отстойник»

$$n_1^{av} \leq \Theta_{\text{ила}} / \Theta \leq n_2^{av}; \quad (3.66)$$

б) на содержание растворенного кислорода в аэротенке

$$Y_2 \geq Y_2^{\min}; \quad (3.67)$$

в) на управляющие воздействия

$$0 < p^{av} < 1, \quad u^{av} \in U; \quad (3.68)$$

а также выполняется уравнение связи

$$\underline{f}'(T, pH, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7, p^{av}, u^{av}) = \underline{0}, \quad (3.69)$$

представляющее математическую модель процесса биохимической очистки. В задаче А-I использованы обозначения: $Y_1, Y_4, Y_5, Y_2, Y_2, Y_7$ – соответственно концентрации ХПК, аммонийного и нитратного азота, растворенного кислорода и ингибитора; Y_3, Y_6 – соответственно концентрации микроорганизмов активного ила и нитрифицирующих бактерий; $\Theta_{\text{ила}}, \Theta$ – соответственно средний возраст ила и среднее время пребывания частиц жидкости в аэротенке; Y_2^{\min} – значение минимально допустимой концентрации растворенного кислорода (обычно 1,5 – 2,0 мг/л); n_1^{av}, n_2^{av} – допустимые границы изменения отношения $\Theta_{\text{ила}} / \Theta$; p^{av}, u^{av} – соответственно отношение рециркуляции и расход воздуха, подаваемого на аэрацию; \underline{f}' – нелинейная векторная функция алгебраического типа; U – множество допустимых значений управления u^{av} .

Поскольку расход жидкости нестационарный, значение среднего времени пребывания частиц жидкости в аэротенке вычисляется по формуле

$$\Theta = \frac{1}{V} \int_{t_0}^t R(v) dv, \quad (3.70)$$

где V – объем аэротенка; $R(t)$ – расход воды; t_0, t – соответственно момент регистрации гидравлического и/или концентрационного возмущения в канализационном коллекторе и текущее время.

Для определения $\Theta_{\text{ила}}$ воспользуемся выражением (при условии представления гидродинамической структуры аэротенка моделью ячеечного типа)

$$\Theta_{\text{ила}} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} x_i V_i'}{\frac{1}{V} \left\{ x_p \int_{t_0}^t [R(v) - R_w(v)] dv + \bar{x}(\bar{r}) \int_{t_0}^t R_w(v) dv \right\}}, \quad (3.71)$$

в котором V – объем аэротенка; x_p – концентрация ила в рецикле; $R_w(t)$ – расход избыточного ила; x_i – концентрация ила в i -й ячейке аэротенка; V_i' – объем i -й ячейки аэротенка.

Смысл ограничения (3.66) состоит в том, чтобы «сбалансировать» гидродинамический и биохимический режимы работы станции БХО в период действия аварийных возмущений за счет p^*, u^* . При этом выбор значений p^*, u^* производится в режиме нормальной эксплуатации станции.

Поскольку решение задачи А-I осуществляется в условиях опережения возмущений, то в момент реального входа их в подсистему «аэротенк – вторичный отстойник» состояние процесса биохимической очистки может измениться под действием случайных факторов. Возникает необходимость в коррекции p^*, u^* .

Учитывая высокую скорость распространения возмущений в рассматриваемой подсистеме, оперативное решение задачи А-I не представляется возможным. В таком случае зафиксируем найденное значение p^* , а все случайные отклонения состояния процесса биохимической очистки будем рассматривать одновременно с двух позиций – обеспечения активного ила необходимым количеством растворенного кислорода и сокращения перерасхода воздуха в системе аэрации. Для этого сформулируем задачу стабилизации кислородного режима на станции БХО.

Задача А-II. Для заданных p^* и значений расхода R , известных в дискретные моменты времени $t = 1, 2, \dots$, найти такие значения u^o , при которых выполняется условие

$$c(t) = Y_2^{**}, \quad (3.72)$$

удовлетворяется ограничение на управление

$$u^{av} \in U \quad (3.73)$$

и оказывается справедливым уравнение связи

$$c(t) = \varphi'(c(t-1), u(t), R(t), \varepsilon(t), p^*), \quad (3.74)$$

где $c(t)$, $c(t-1)$ – значения концентрации растворенного кислорода в аэротенке, соответствующие моментам времени t и $t-1$; Y_2^{**} – значение концентрации растворенного кислорода, найденное в результате решения задачи А-I; $\varepsilon(t)$ – погрешность моделирования, измерения и функционирования исполнительного механизма в момент времени t ; $\varphi'(\cdot)$ – некоторая нелинейная функция.

Заметим, что решение задачи А-II осуществляется на интервале «аварийных» возмущений в режиме «on-line».

После снятия указанных возмущений, в системе аварийной защиты возникает задача перехода к режиму нормальной эксплуатации станции БХО. Ее постановка соответствует задаче А-I. При этом должен учитываться тот факт, что в результате действия «аварийных» возмущений в режиме в подсистеме «аэротенк – вторичный отстойник» может измениться биологическая активность микроорганизмов, произойти распад хлопьев и т.д. В связи с этим в системе предусмотрена коррекция параметров модели (3.74).

В блочном виде система аварийной защиты станции БХО представлена на рис. 3.12.

Подсистема упреждения «срыва» статического режима содержит:

- многомерную нелинейную модель, с помощью которой производится анализ влияния гидравлических и концентрационных возмущений на величину Θ и $\Theta_{ила}$;
- линейную модель усреднителя;
- алгоритмы коррекции параметров нелинейной модели и оптимизации критерия (3.65).

На станции БХО усреднитель обеспечивает сглаживание влияния гидравлических и концентрационных пульсаций входного потока жидкости. Поэтому на вход нелинейной модели поступают усредненные значения «аварийных» возмущений.

Подсистема стабилизации содержит упрощенную одномерную модель растворения и поглощения кислорода в жидкости, а также алгоритмы коррекции ее параметров и адаптивной стабилизации, реализуемые в реальном масштабе времени.

Проверка основных идей, положенных в основу системы аварийной защиты станции БХО, осуществлялась средствами имитационного

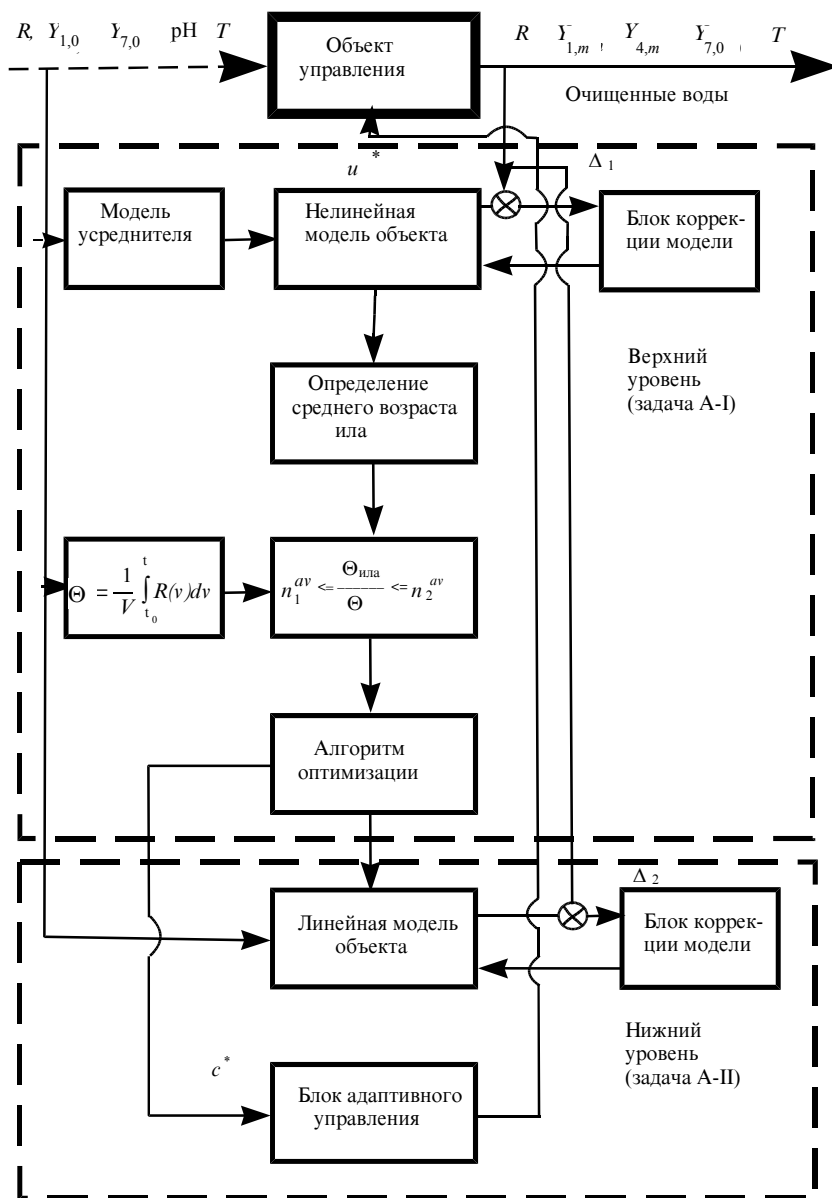


Рис. 3.12 Блок-схема системы аварийной защиты станции БХО

эксперимента на ПЭВМ. В подсистеме упреждения «срыва» процесса использовалась модель, описанная в работе [42]. Модель усреднителя была представлена уравнением [9]:

$$x_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{T_2} \int_{t-T_2}^t x_{\text{вх}}(\tau) d\tau, \quad (3.75)$$

в котором $x_{\text{вх}}, x_{\text{вых}}$ – соответственно концентрации таких примесей, как Y_1, Y_4, Y_7 и рН на входе и выходе усреднителя; $T_2 = 2V_u/G$ – интервал усреднения; V_u, G – соответственно объем и пропускная способность усреднителя.

Вместо векторного критерия (3.65) в задаче А-I был использован скалярный критерий

$$F = \frac{\text{БПК}_5}{\text{БПК}_5^{\text{lim}}} + \frac{Y_{4,m}}{Y_{4,m}^{\text{lim}}}, \quad (3.76)$$

где $\text{БПК}_5, \text{БПК}_5^{\text{lim}}$ – соответственно значения биохимической потребности в кислороде в контрольном створе водоема-приемника и ее предельно допустимое значение; $Y_{4,m}, Y_{4,m}^{\text{lim}}$ – соответственно значение концентрации субстрата нитрифицирующих микроорганизмов на выходе аэротенка и ее предельно допустимое значение.

Расчет БПК производится в соответствии с результатами работы [36]. Решение задачи А-І и коррекция параметров нелинейной модели подсистемы «аэротенк – вторичный отстойник» осуществлялись симплекс-методом. В подсистеме стабилизации использовалась модель вида

$$\frac{dc}{dt} = \frac{R}{V} [c_0 - (1 + p^{av})c] + k_1^u u^{av} (c^H - c) - k_2^u, \quad (3.77)$$

в которой c_0 – концентрация растворенного кислорода во входном потоке; V, R – соответственно объем аэротенка и расход воды; p^{av} – отношение рециркуляции; u^{av} – расход воздуха в системе аэрации; c^H – концентрация насыщения растворенного кислорода; k_1^u, k_2^u – неизвестные параметры модели.

Использование упрощенной модели с сосредоточенными переменными для аэротенка, являющегося в сущности объектом с распределенными переменными, продиктовано следующими важными обстоятельствами:

- стабилизацией кислорода в сравнительно узком диапазоне значений;
- необходимостью обработки информации в темпе с процессом;
- прямым включением в (3.77) значений R, p^{av}, u^{av} ;
- возможностью текущей коррекции модели «под процесс».

Целесообразность применения (3.77) стабилизации подтверждается и результатами исследования статических режимов работы аэротенка. В частности, следуя рекомендациям Бойте [33], относящимся к рациональному распределению входного потока по длине 1-го – k -го коридоров аэротенка, было найдено, что минимальная концентрация растворенного кислорода обычно наблюдается на выходе аэротенка. В таком случае оправдано использование модели с гидродинамическим режимом типа «полного смешения».

В дискретном виде решение уравнения (3.77) имеет вид:

$$\tilde{c}(t+1) = \Phi(t)^T \lambda(t) + \varepsilon(t+1), \quad t = 0, 1, 2, \dots, \quad (3.78)$$

где $\tilde{c}(t+1)$ – концентрация растворенного кислорода, соответствующая $(t+1)$ -му моменту времени;

$\Phi(t) = \left\{ \tilde{c}(t), R(t) \left[(1 + p^{av}) \tilde{c}(t) - c_0 \right], u^{av}(t) \left[\tilde{c}(t) - c^H \right], 1 \right\}^T$ – вектор входных переменных;

$\lambda(t) = \left\{ 1, -dt/V, -k_1^{av} dt, -k_2^{av} dt \right\}^T$ – вектор параметров модели; dt – шаг дискретизации решения по времени.

Для коррекции параметров модели воспользуемся рекуррентным алгоритмом наименьших квадратов

$$\tilde{\lambda}(t+1) = \lambda(t) + \eta^{av}(t) p^{av}(t) \Phi(t) \left[c(t+1) - \tilde{c}(t+1) \right], \quad (3.79)$$

в котором $p^{av}(t)$ – ковариационная матрица, удовлетворяющая уравнению

$$p^{av}(t) = p^{av}(t-1) \left[I - \frac{\Phi(t) \Phi(t)^T p^{av}(t-1) \eta^{av}(t)}{1 + \eta^{av}(t) \Phi(t)^T p^{av}(t-1) \Phi(t)} \right], \quad (3.80)$$

а $\eta^{av}(t)$ – функция переключения, имеющая вид

$$\eta^{av}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{\left[c(t+1) - \tilde{c}(t+1) \right]^2}{1 + \Phi(t)^T p^{av}(t-1) \Phi(t)} > \Delta; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.81)$$

Здесь $c(t+1)$ – экспериментальное значение концентрации растворенного кислорода, соответствующее $(t+1)$ -му моменту времени; I – единичная матрица; Δ – допустимая погрешность модели;

$$p^{av}(0) = I \cdot 10^8.$$

Смысл функции состоит в том, чтобы сохранять оценки параметров модели постоянными, пока ошибка прогноза $c(t+1) - c(t)$ оказывается меньше установленного уровня. Этим обеспечивается глобальная сходимость алгоритма адаптивной стабилизации [56, 62]. После определения вектора параметров $\tilde{\lambda}(t)$ решение задачи А-II сводится к замене $\tilde{c}(t+1)$ на Y_2^{**} и определению $u^0(t)$ из уравнения

$$Y_2^{**} = \Phi(t)^T \tilde{\lambda}(t), \quad (3.82)$$

линейного по управлению.

Предложенная система аварийной защиты может найти широкое применение на станции БХО, обслуживающей гибкие химико-технологические производства. В этом случае упрощается задача оперативной диагностики возмущений и оценки их влияния на работу подсистемы «аэротенк – вторичный отстойник».

Результаты работы системы аварийной защиты и управления станцией БХО сточных вод для модели станции приведены в разделе 4.4.

Вопросы для самопроверки

1 Каким образом можно представить информацию о поведении объектов при исследовании математических моделей биохимических процессов?

2 Почему чаще всего при имитационном исследовании математической модели биохимических процессов для задания значений параметров, входных переменных используется датчик равномерно распределенных последовательностей?

3 Какие гипотезы о гидродинамической структуре потоков можно предложить при разработке математической модели аэротенка коридорного типа?

4 Для каких целей в технологической схеме очистки сточных вод используется денитрификатор?

5 Каким образом связаны основные компоненты математической модели реки с малым расходом воды?

6 Какие функции должна выполнять система автоматической аварийной защиты и управления станцией биохимической очистки сточных вод?

4 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАНЦИЙ БИОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

4.1 Автоматизация проектных расчетов при реконструкции городских очистных сооружений

В связи с увеличением расхода городских и производственных сточных вод, поступающих на городские очистные сооружения г. Моршанска Тамбовской обл. с $18\,000\text{ м}^3/\text{сут}$ до $43\,000\text{ м}^3/\text{сут}$, возникла необходимость реконструкции и расширения станции БХО. Характеристики сточных вод, поступающих на очистные сооружения, приведены в табл. 4.1.

4.1 Входные характеристики сточных вод для очистных сооружений г. Моршанска

НАИМЕНОВАНИЕ	ЕДИНИЦА ИЗМЕРЕНИЯ	КОЛИЧЕСТВО
Суточный расход для новой очереди станции БХО	м ³ /сут	25 000
Концентрация взвешенных веществ в поступающей воде	мг/л	250
БПК _{полн} поступающих сточных вод	мг/л	250
БПК _{полн} очищенных сточных вод	мг/л	15
Концентрация общего фосфора	мг/л	10
Концентрация аммонийного азота	мг/л	25

В результате решения задачи выбора структуры технологической схемы новой очереди очистных сооружений выбрана схема, в состав которой вошли следующие стадии: предварительное усреднение, обычное осаждение (первичное), очистка активным илом, осаждение (вторичное), фильтрование (доочистка).

Найденный вариант последовательности технологических стадий подтвержден исследованиями, выполненными в НИИ КВОВ, для состава сточных вод, поступающих на очистные сооружения г. Моршанска.

При решении задачи расчета аппаратного оформления новой очереди очистных сооружений были выбраны следующие основные сооружения (табл. 4.2, п. 1 – 7).

В состав оборудования новой очереди очистной станции помимо основных сооружений входят промежуточные емкости, насосы и другое вспомогательное оборудование. Все сооружения станции связаны между собой коллекторами и трубопроводами, осуществляющими транспорт сточной воды, воды промывной и иловой, избыточного, циркуляционного и уплотненного ила, осадка, воздуха и др. Так, например, к аэротенку (ТП 902-2-396.86) подводятся коллекторы для подвода и отвода сточной воды, подвода циркуляционного ила, опорожнения аэротенка и воздуховод для подачи в сооружения воздуха.

4.2 Список основных объектов новой очереди очистной станции г. Моршанска

№ п/п	Наименование	Номер типового проекта	Количество
1	Приемная камера	ТП 902-2-407С.86	1
2	Песколовка	ТП 902-2-331	2
3	Первичный радиальный отстойник	ТП 902-2-483.91	4
4	Аэротенк	ТП 902-2-396.86	1
5	Вторичный радиальный отстойник	ТП 902-2-447.88	4
6	Установка доочистки сточных вод	ТП 902-4-10.84	1
7	Насосно-воздуходувная станция для подачи воздуха в аэротенк	ТП 902-9-20	1
8	Регулирующий резервуар		1

9	Песковая площадка		1
10	Корпус обезвоживания осадка		1
11	Котельная		1
12	Административно-бытовое здание		1
13	Станция приготовления растворов и П/С 35 кв.		1
...

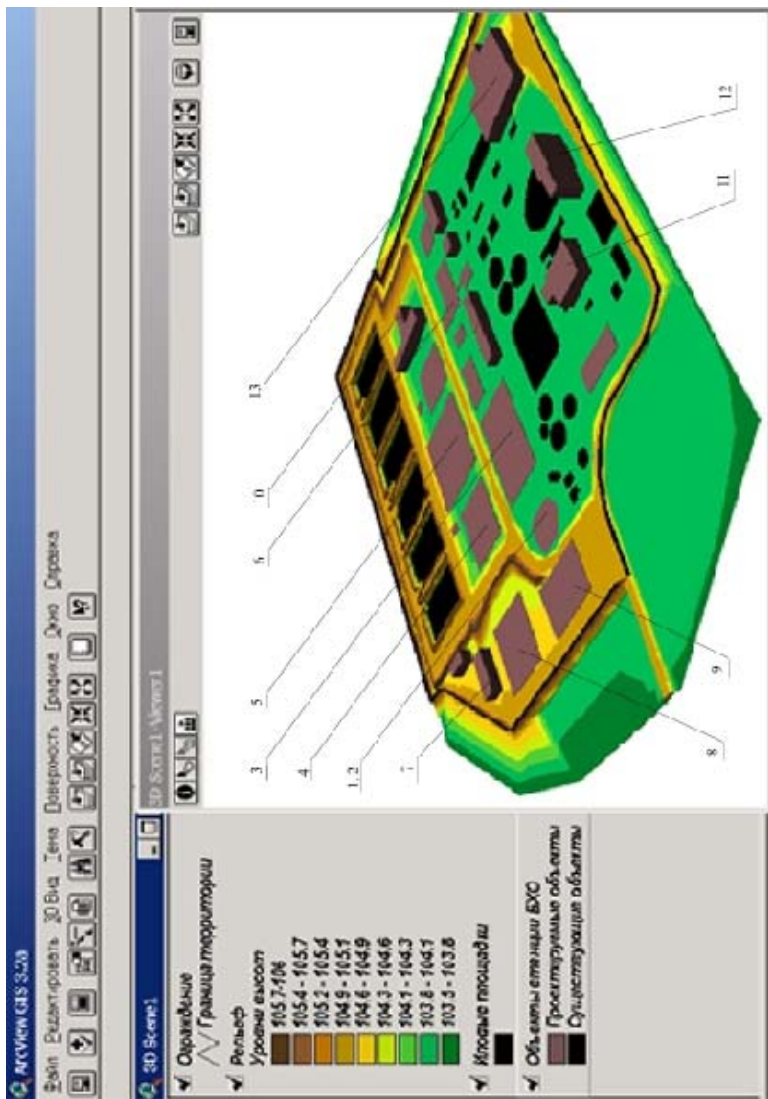


Рис. 4.1 3D-изображение ситуационного плана реконструкции и расширения очистных сооружений г. Моршанска

Размещение сооружений новой очереди станции на генплане осложняется тем, что они имеют технологические связи с оборудованием действующей станции. Из-за сложности формализации этапа формирования технологических связей между всеми единицами оборудования, он выполняется традиционным (ручным) способом опытными проектировщиками.

Формирование базы исходных данных (см. раздел 2.4) для решения задачи размещения объектов станции осуществлялось в соответствии с рекомендациями СНиП II-89-80 «Генеральные планы промышленных предприятий» [47] и СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» [46]. Координаты размещения отдельных объектов, таких как котельная, административно-бытовое здание и других, были фиксированы проектировщиками.

Результаты автоматизированного размещения объектов новой очереди очистных сооружений на

генплане, выполненного в среде геоинформационной системы Arcinfo, приведены на рис. 4.1. Для получения 3D-изображения использован модуль 3D Analyst компонента системы – Arcview версии 3.2. На рис. 4.1 номера объектов соответствуют их порядковым номерам, приведенным в табл. 4.2. Анализ результатов размещения, выполненный опытными проектировщиками, говорит о их хорошем качестве.

4.2 Прогнозирование режимов функционирования реконструируемых станций биохимической очистки сточных вод

При проведении реконструкции станции БХО сточных вод Новочеркасского завода синтетических продуктов в качестве перспективного варианта технологической схемы была выбрана схема, центральный блок которой будет представлять собой два параллельно работающих двухсекционных трехкоридорных аэротенка с размерами коридора $84 \times 6 \times 5 \text{ м}^3$.

При исследовании гидродинамической структуры потоков действующего аэротенка станции БХО проведен трассерный эксперимент, осуществленный радиоактивным индикатором йод-131. На рис. 4.2 зоны импульсного запуска изотопа в аэротенк обозначены крестиками, а зоны регистрации интенсивности радиоактивного излучения – звездочками. Нормированные функции плотности распределения времени пребывания (ПРВП) для одного и двух окислительных коридоров обеих секций аэротенка изображены на рис. 4.3. Проверка гипотез о гидродинамической структуре потоков в аэротенке, описанной уравнениями (3.20) – (3.24), показала, что при решении задачи (3.20) – (3.21) не найдено

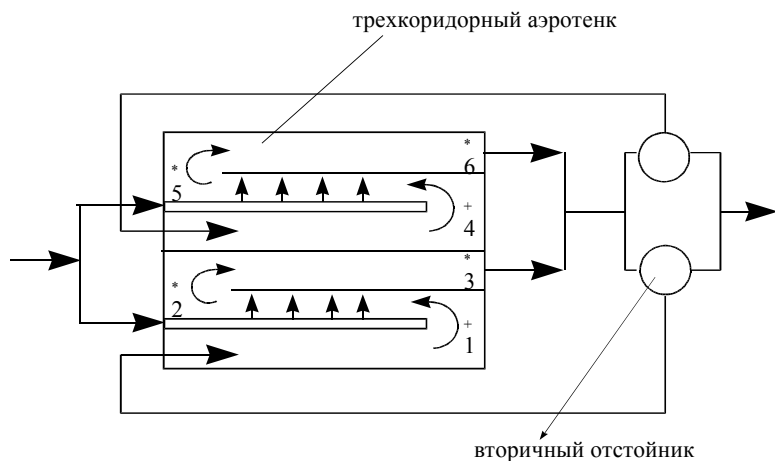


Рис. 4.2 Схема действующей станции биохимической очистки сточных вод

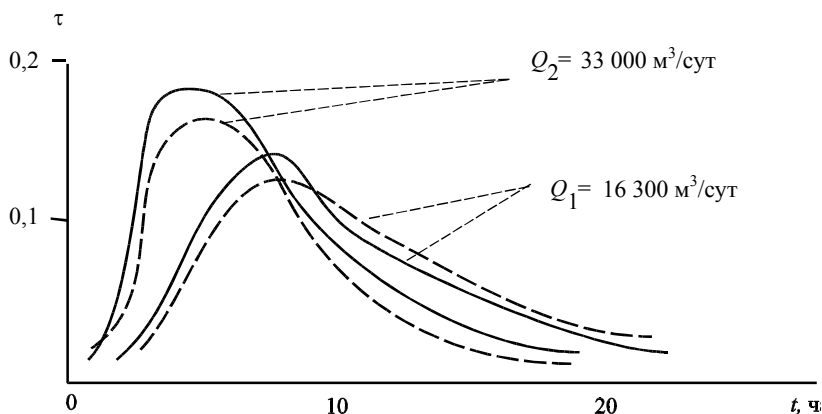


Рис. 4.3 Графики функций ПРВП для действующей (1) и новой (2)

станции БХО: сплошные линии – эксперимент, пунктирные – расчет

ни одного числа ячеек для каждого коридора, при котором значение средней квадратической относительной ошибки было меньше 25 %. В ходе решения задачи (3.21) – (3.24) были получены следующие значения $n_{\beta_{2-3}}, n_{\alpha_{2-3}}, \alpha_{2-3}, \beta_{2-3}$, изображенные на рис. 4.4, а. Средняя квадратическая относительная ошибка составила 13,2 %. Таким образом, делаем вывод: гидродинамическая структура потоков описывается ячеечной моделью с прямыми байпасирующими и обратными рециркулирующими потоками.

Для описания процессов биохимических превращений была выбрана математическая модель (3.25) – (3.34). При идентификации модели, выполненной с помощью подсистемы автоматизированного моделирования, была использована экспериментальная информация, накопленная в период с 20 июня 1978 г. по 20 июня 1979 г. на действующей станции БХО. В это время анализировались ХПК воды на входе в аэротенк, ХПК воды, температура, концентрации растворенного кислорода и аммонийного азота на выходе из аэротенка. На их основе можно рассчитать кинетические параметры только процесса биохимического окисления ГМО.

Имитационное испытание модели проводилось по схеме, изображенной на рис. 4.6 (положение переключателя П \rightarrow I), позволяющей создать на базе имеющейся экспериментальной информации модель, адекватную исследуемому аэротенку. Поскольку при реализации метода статистических испытаний вид совместной плотности изменения параметров модели $k_s \in [k_s^*, k_s^{**}]$, $s = \overline{1, 7}$ неизвестен, воспользуемся датчиком равномерно распределенных случайных последовательностей. Последовательность комбинаций начальных условий $Y_{i,0} \in [Y_{i,0}^*, Y_{i,0}^{**}]$, $i = \overline{1, 2}$, взятых из эксперимента, также определим с помощью данного датчика.

Из реакций модели, удовлетворяющих областям изменения экспериментальных данных на выходе из аэротенка $Y_{i,m}^D \in [Y_{i,m}^*, Y_{i,m}^{**}]$, $i = \overline{1, 2}$, будем формировать допустимые диапазоны изменения параметров $k_s \in [k_s^*, k_s^{**}]$, $s = \overline{1, 7}$.

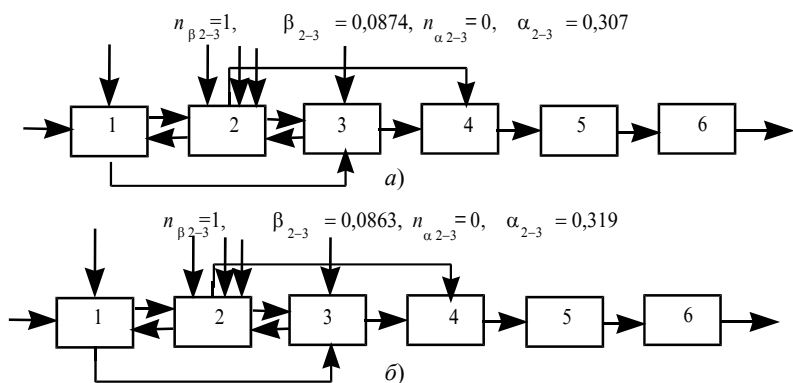


Рис. 4.4 Схема потоков в аэротенке действующей (а) и новой (б) станции БХО

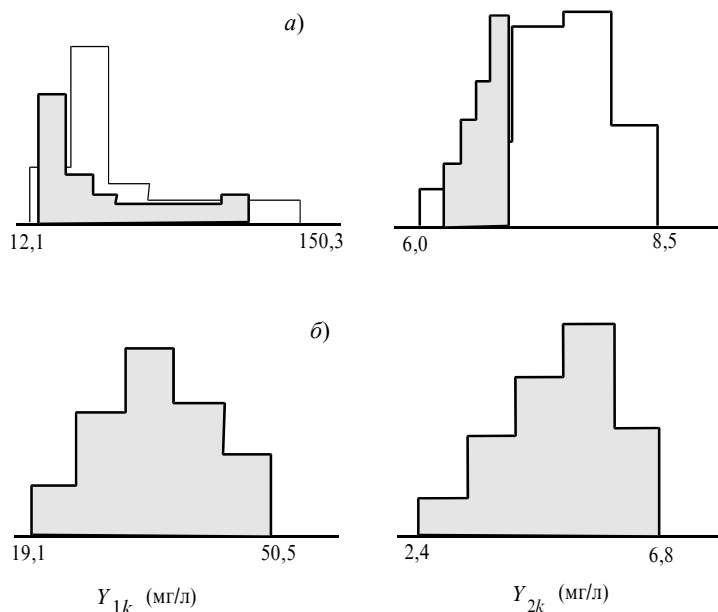


Рис. 4.5 Гистограммы значений выходных переменных, полученных при идентификации модели (а) и прогнозировании для новой станции БХО (б). Незаштрихованные области – все множество реакций, заштрихованные – допустимые реакции

Для выяснения диапазонов изменения параметров было проведено 3822 решений системы уравнений модели. В 19,4 % решений результаты удовлетворяют экспериментальным данным. В табл. 4.3 приведены изначально заданные диапазоны и диапазоны, при которых получены допустимые реакции, а на рис. 4.5, а – гистограммы значений выходных переменных $Y_{1,m}$, $Y_{2,m}$.

4.3 Диапазоны изменения констант модели кинетики для аэротенка станции БХО

№ п/п	Коэффициент	Единица измерения	Заданный диапазон	Результирующий диапазон
-------	-------------	-------------------	-------------------	-------------------------

1	k_1	мг/л	0,70	0,85	0,72	0,82
2	k_2	мг/л	0,40	0,60	0,50	0,59
3	k_3	мг/л	0,55	0,70	0,55	0,60
4	k_4	1/сут	0,60	0,70	0,60	0,64
5	k_5	мг/мг	0,00 3	0,008	0,003	0,006
6	k_6	1/сут	30,0 0	60	30,00	49,90
7	k_7	—	0,55	0,80	0,55	0,60

Для выполнения прогнозов качества сточных вод на выходе новой станции БХО была выполнена коррекция гидродинамической структуры потоков в аэротенке. С этой целью осуществлен пересчет экспериментальных кривых вымывания трассерного вещества на новый расход. Результаты пересчета и решения задачи параметрической идентификации проиллюстрированы на рис. 4.4, б и 4.3.

В связи с тем, что входные характеристики смешанного стока будут изменены, то была осуществлена коррекция кинетических закономерностей на основе экспериментов на лабораторном аэротенке. При обработке их результатов было выявлено изменение, в основном, константы скорости ГМО, диапазон изменения которой стал равным $1,25 \dots 1,36 \text{ сут}^{-1}$.

Среднюю загрязненность смешанного стока определим, исходя из того, что по данным существующей городской станции БХО бытовой сток является практически стационарным со средней загрязненность 250 мг/л, а для производственного стока она составляет 229 мг/л.

Рис. 4.6 Схема идентификации математической модели (I) и прогноза (II)

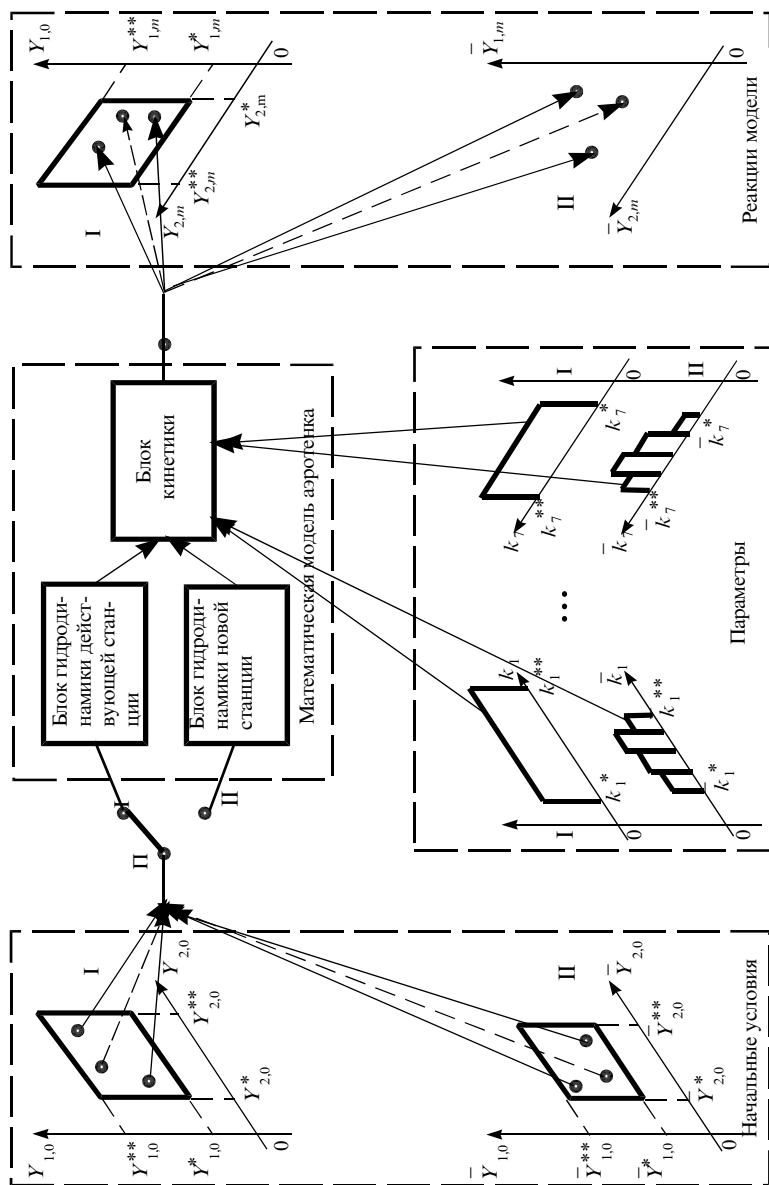


Рис. 4.6 хема идентификации математической модели (I) и прогноза (II)

На основании этих данных средняя загрязненность смешанного стока равна:

$$\bar{Y}_{1,0} = (42000 \cdot 250 + 24000 \cdot 229) / 66000 = 242 \text{ мг/л ХПК} .$$

Прогнозирование сточных вод на выходе новой станции БХО проведем по схеме, изображенной на рис. 4.6 (положение переключателя $\Pi \rightarrow \Pi$). При этом, примем диапазон изменения $Y_{1,0} \in [242 \pm 20 \%$ мг/л ХПК. Результаты прогнозирования приведены на рис. 4.5, б. Математическое ожидание колебаний ХПК на выходе аэротенка составило 31,4 мг/л, значение среднеквадратического отклонения – 5,6 мг/л.

4.3 Исследование кинетики процесса денитрификации сточных вод

В разделе 3.2.3 приведена математическая модель аппарата, в котором осуществляется процесс денитрификации сточных вод. Рассмотрим методику определения кинетических констант процесса денитрификации. Константы могут быть определены в ходе имитационного испытания при использовании подсистемы автоматизированного моделирования [34]. В качестве альтернативной методики будем использовать методику, основанную на анализе данных, полученных в ходе эксперимента на лабораторной установке. Схема такой установки приведена на рис. 4.7. Процесс на ней идет в условиях проточного культивирования микроорганизмов.

Процесс денитрификации осуществляется в стеклянном аппарате 1 емкостью 5,5 литра. В реакторе с помощью ультратермостата 9 (тип U-2), подключенного к стеклянному змеевику 8, поддерживается постоянная температура суспензии. Сточные воды помещаются в емкость объемом 20 литров и с помощью откалиброванного насоса-дозатора 3 подаются в капельницу 4, где грубодисперсные примеси удерживаются с помощью фильтра из ткани типа «бельтинг». В верхней части аппарата устанавливается фильтр 5, изготовленный из полого стеклянного цилиндра, фильтровальной бумаги типа «черная лента» (площадь фильтра 28 см²). Фильтрат самотеком выводится через штуцер 6 и анализируется. Выпускной капилляр 7 служит для выпуска небольших количеств избыточного ила. Регулированием расхода суспензии определяется средний возраст ила в аппарате.

Для создания в аппарате условий, близких к идеальному перемешиванию, используется перемешивание суспензии в реакторе с помощью мешалки (тип ML-2) с гибким приводом 10 – 12. В этих условиях процесс протекает в кинетической области. Доказательство степени

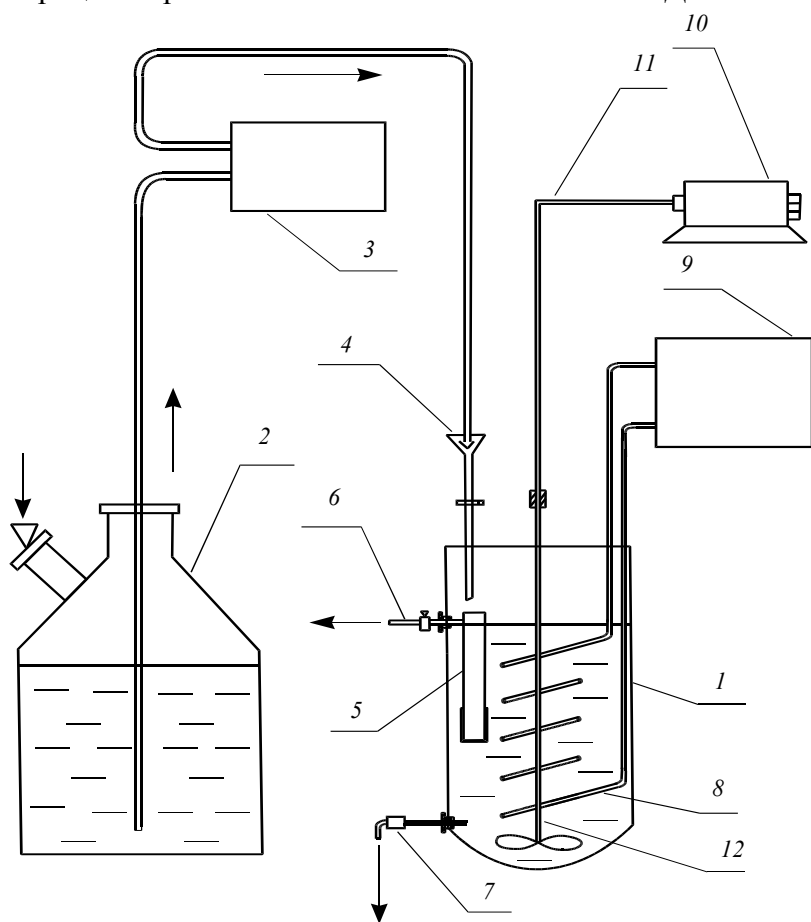


Рис. 4.7 Схема экспериментальной установки для определения констант модели непрерывного процесса денитрификации

соответствия гидродинамической структуры в аппарате режиму полного смешения проведем на основе проведения трассерного эксперимента. Для чего, меняя частоту вращения мешалки, создадим различную степень перемешивания. Необходимую скорость вращения мешалки определим путем введения в реактор красителя. При скорости вращения от 150 до 200 об/мин время выравнивания окраски суспензии составляет 2 – 6 с. При больших скоростях наблюдается процесс захвата воздуха за счет турбулизации потока.

Для найденной скорости вращения мешалки в реактор объемом V^d , с расходом \tilde{R}^d в момент времени $t = 0$ вводится в виде δ -импульса трассер в количестве M^d .

Кривая вымывания, описывающая изменение концентрации трассера $c(t)$ на выходе реактора, имеет вид:

$$c(t) = \frac{M^d}{V^d} \exp\left(-\frac{\tilde{R}^d}{V^d} t\right). \quad (4.1)$$

Наиболее доступным трассером является NaCl, концентрация которого прямо пропорциональна электропроводности раствора, измеряемой кондуктометром (тип ОК-102). Для анализа используем дистиллированную воду, количество трассера – 50 мл насыщенного раствора NaCl. Расход $\tilde{R}^d = 10$ л/ч стабилизировался с помощью насоса-дозатора.

После практически мгновенного введения трассера отмечаем время по секундомеру и с интервалом 3 мин записываем показания кондуктометра. Объем воды в аппарате составлял 4,8 литра. Данные трассерного эксперимента приведены в табл. 4.4 и проиллюстрированы на рис. 4.8. Максимальная относительная ошибка при сравнении теоретических концентраций, вычисленных по формуле (4.1), и экспериментальных данных не выше 3,55 %. Таким образом, для описания гидродинамической структуры потоков суспензии в денитрификаторе будем использовать модель полного смешения.

4.4 Результаты трассерного эксперимента

Номер замера	Время, мин	Электропроводность, %	Номер замера	Время, мин	Электропроводность, %
1	0	92,2	12	33	28,6
2	3	82,3	13	36	25,9
3	6	76,1	14	39	23,1
4	9	68,2	15	42	20,5
5	12	61,3	16	45	18,7
6	15	55,2	17	48	16,3
7	18	48,5	18	51	14,5
8	21	43,6	19	54	13,3
9	24	40,2	20	57	11,6
10	27	35,4	21	60	10,3
11	30	32,8			

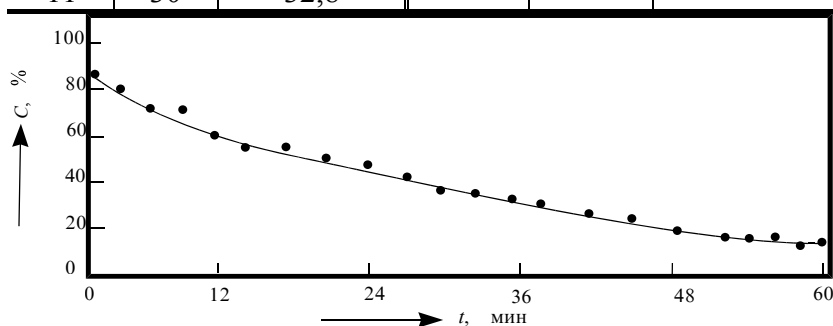


Рис. 4.8 График кривой вымывания трассерного вещества

Уравнения (3.40) – (3.42) преобразуем по методу Лайнуивера-Бэрка [5]:

$$\left[\frac{R^{dw}}{V^d}\right] = k_5^d \left[\frac{\frac{R^d}{V^d} (Y_{1,0}^d - Y_1^d)}{Y_3^d}\right] - k_4^d; \quad (4.2)$$

$$\left[\frac{1}{\frac{R^d}{V^d} (Y_{1,0}^d - Y_1^d)} \right] = \frac{k_2^d}{k_1^d} \left[\left(\frac{Y_1^d}{Y_3^d} \right) \right] + \frac{1}{k_1^d}; \quad (4.3)$$

$$\left[\frac{R^{dw}}{V^d} \right] = \left[\frac{R^d}{V^d} (Y_{1,0}^d - Y_1^d) \right] - \left(\frac{k_5^d}{k_6^d} k_3^d + k_4^d \right). \quad (4.4)$$

Константы процесса денитрификации находятся из уравнений (4.2) – (4.4), имеющих вид $y = a_0x + a_1$, как коэффициенты a_0 и a_1 или их комбинации (значения выражений в квадратных скобках играют роль y и x).

Варьируя в ходе эксперимента значения $R^d, R^{dw}, Y_{1,0}^d, Y_{2,0}^d$, на выходе из аппарата в стационарном режиме получаем различные комбинации Y_1^d, Y_2^d . Определяющим параметром процесса проточного культивирования микроорганизмов [45] является время пребывания клеток в биологическом реакторе (см. рис. 3.8), которое определяется расходом R^{dw} :

$$t' = \frac{V^d}{R^{dw}}. \quad (4.5)$$

В ходе проведения эксперимента будем постоянно увеличивать t' , уменьшая R^{dw} , и, начиная с некоторого значения t' , создадутся условия, необходимые для денитрификации.

Методика проведения эксперимента заключается в следующем:

1 Адаптация ила к условиям культивирования. Для этого в реактор со сточной водой помещается небольшое количество анаэробного ила с действующей станции биохимической очистки сточных вод. Включаем мешалку и с помощью фотоколориметра (ФЭК-56) с интервалом 1 час определяем оптическую плотность суспензии. По заранее откалиброванной кривой, выполненной согласно методике, описанной в работе [21], находим приблизительное значение Y_3^d . Измерения проводятся до тех пор, пока концентрация денитрификаторов будет $Y_3^d > 0,5$ г/л, так как при меньших значениях Y_3^d течение процесса денитрификации неэффективно.

2 Процесс денитрификации активным илом. После адаптации ила включаем насос-дозатор и устанавливается поток R^d . Стабилизация концентрации ила определяется с помощью ФЭК-56. При установлении статического режима производятся точные замеры $Y_{1,0}^d, Y_{2,0}^d, Y_1^d, Y_2^d, Y_3^d$, осуществляемые на основе стандартных методик [3].

В ходе проведения эксперимента на производственных сточных водах одного из химических предприятий поддерживались следующие условия процесса: температура $+26^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 7,5 \dots 8,0$, которые, исходя из ряда работ [50, 58], обеспечивают оптимальное течение процесса денитрификации. Отсутствие растворенного кислорода контролировалось кислородомером (тип № 5221). Результаты эксперимента сведены в табл. 4.5.

Аппроксимируя экспериментальные данные в координатах, соответствующих $y-0-x$ уравнений (4.2) – (4.4), получаем искомые кинетические константы. В отличие от уравнений (4.2), (4.4), уравнение (4.3) содержит три неизвестных параметра k_1^d, k_2^d, k_7^d . Если предположить,

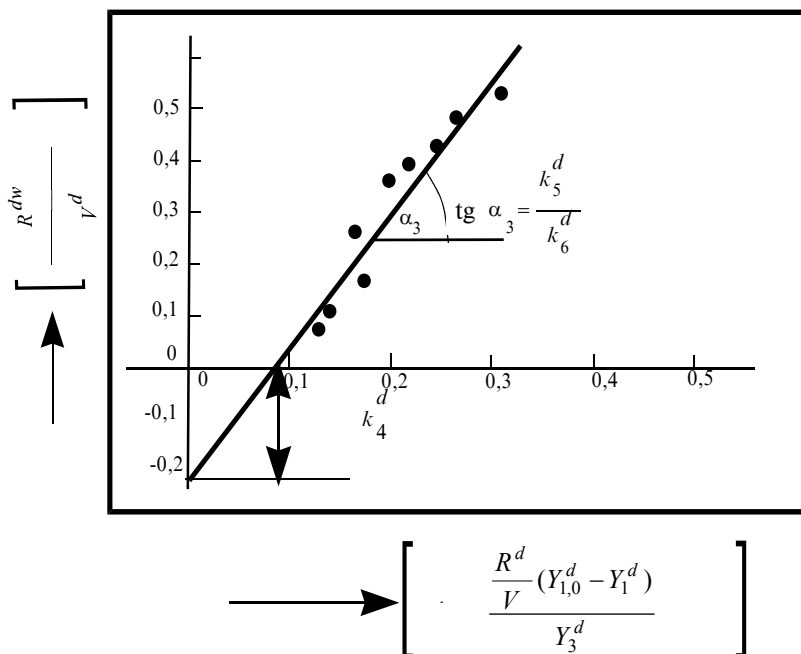


Рис. 4.9 Определение констант k_3^d , k_6^d

4.5 Результаты эксперимента по определению кинетических констант модели процесса денитрификации

Но- мер опы- та	R^d , л/сут	R^{dw} , л/сут	V^d , л	Y_3^d , мг/л	$Y_{1,0}^d$, мг/л	$Y_{2,0}^d$, мг/л	Y_1^d , мг/л	Y_2^d , мг/л
1	9,22	0,42	4,8	2132, 4	526	151,3	49,4	15,4
2	9,22	0,64	4,8	1881, 8	524	155,9	57,3	16,8
3	9,22	0,89	4,8	1724, 3	509	156,2	73,1	19,9
4	9,22	1,25	4,8	1671, 5	521	158,9	80,9	22,4
5	9,22	1,54	4,8	1403, 3	527	151,7	107, 7	29,0
6	9,22	1,79	4,8	1252, 2	517	151,6	107, 6	28,9
7	9,22	1,84	4,8	1026, 3	524	152,1	123, 2	33,4
8	9,22	2,10	4,8	914,3	514	151,4	137, 1	35,4
9	9,22	2,25	4,8	857,4	523	155,4	141, 4	39,9

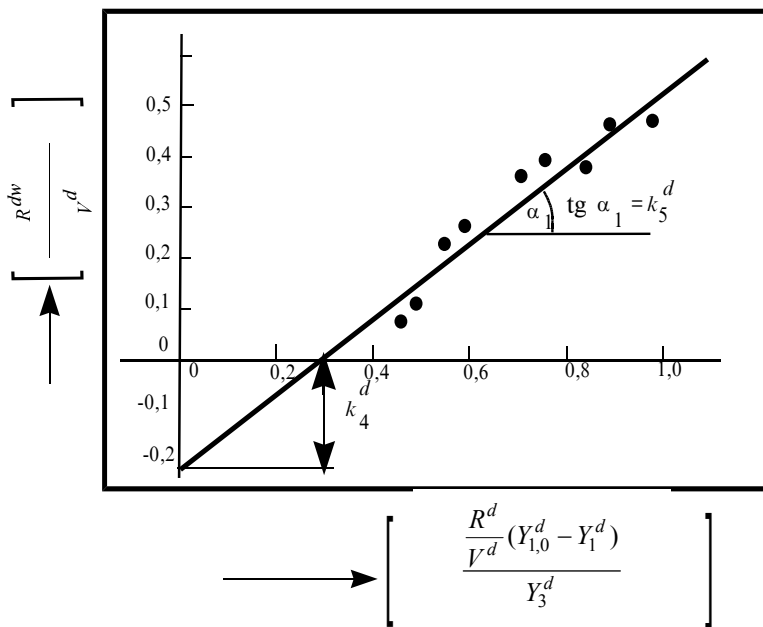


Рис. 4.10 Определение констант k_4^d , k_5^d

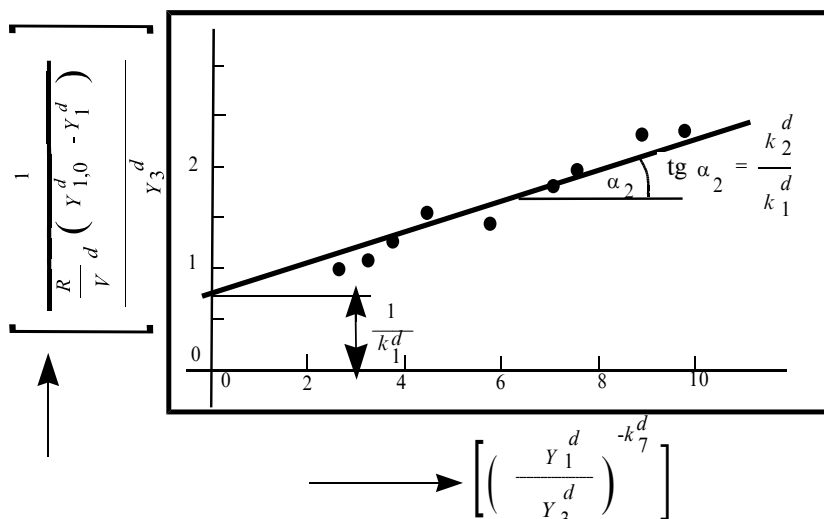


Рис. 4.11 Определение констант k_1^d , k_2^d , k_7^d

что k_7^d известно, то k_1^d , k_2^d находятся так же, как и другие константы. Поиск k_7^d , а затем и k_1^d , k_2^d основан на сканировании всего диапазона изменения k_7^d ($k_7^d \in [0, 1]$) с некоторым шагом Δk . Наиболее эффективен в данном случае метод наименьших квадратов, позволяющий с большой точностью получать коэффициенты прямых, аппроксимирующих экспериментальные данные. Расчет коэффициентов проиллюстрирован на рис. 4.9 – 4.11.

В результате исследования математической модели (4.2) – (4.4) кинетики процесса денитрификации активным илом были получены следующие кинетические константы: $k_5^d = 0,834$; $k_4^d = 0,217$ сут⁻¹; $k_1^d = 1,256$ сут⁻¹; $k_2^d = 0,196$; $k_7^d = 0,625$; $k_6^d = 0,306$; $k_3^d = 0,003$ сут⁻¹.

4.4 Моделирование работы системы аварийной защиты и управления станцией биохимической очистки сочных вод

Подход к разработке системы автоматической аварийной защиты станции БХО, рассмотренный в разделе 3.4, проверим на модели станции, в составе которой «аэротенк – вторичный отстойник» с характеристиками, показанными в табл. 4.6.

4.6 Характеристики подсистемы

НАИМЕНОВАНИЕ	ЕДИНИЦА ИЗМЕРЕНИЯ	КОЛИЧЕСТВО
Количество коридоров аэротенка	–	3
Длина аэротенка	м	45
Ширина коридора аэротенка	м	4,5
Высота аэротенка	м	5
Число ячеек в коридоре (при использовании ячейной модели)	–	3
Радиус вторичного отстойника	м	10
Высота вторичного отстойника	м	3
Входной расход воды	м ³ /сут	12 500

Результаты решения задач А-I и А-II для станции приведены на рис. 4.12 – 4.15. В частности на рис. 4.13 показана ситуация «срыва» статического режима работы станции БХО, возникающая по причине ступенчатого изменения $Y_{1,0}, Y_{7,0}, Y_{4,0}$. С помощью оптимальных управляющих воздействий $p^* = 0,26$, $u^* = 2048,3$ м³/ч, являющихся решением задачи А-I, оказывается возможным «заблокировать» действие аварийных возмущений. При этом, $Y_2^{**} = 2,51$ мг/л, $\Theta_{\text{ила}}/\Theta \in [7,5 \dots 9,5] = 9,3$.

На рис. 4.14 изображена диаграмма подстройки параметров модели под новый кислородный режим в аэротенке, характеризуемый значением Y_2^{**} . Действие случайных факторов в объекте управления имитировалось с помощью датчика случайных чисел $\varepsilon_t \in N(0, 1)$, $t = 1, 2, 3, \dots$. Из этой диаграммы следует, что в случае выбора значений $dt = 30$ с, новые оценки вектора $\tilde{\lambda}(t)$ могут быть найдены за 8 – 10 интервалов дискретностей, или примерно за 5 минут. Такое время идентификации параметров модели (3.78) оказывается приемлемым для последующего решения задачи А-II в подсистеме стабилизации.

На рис. 4.15 изображен процесс управления кислородным режимом в аэротенке. Он сводится к определению таких значений $u^0(t)$, $t = 0, 1, 2, \dots$, при которых удастся скомпенсировать отрицательные воздействия случайных факторов ε_t .

Предложенная система аварийной защиты может найти широкое применение на станции БХО, обслуживающей ПТС. В этом случае упрощается задача оперативной диагностики возмущений и оценки их влияния на работу подсистемы «аэротенк – вторичный отстойник».

4.5 Моделирование процессов самоочищения реки с малым расходом воды

Методику исследования природного водоема проиллюстрируем на примере реки Цны, как приемника очищенных сточных вод промышленных предприятий г. Тамбова, в том числе и ОАО «Пигмент».

Анализ процессов самоочищения воды реки проводился на участке реки длиной 60 км, начиная от точки сброса очищенных сточных вод с очистных сооружений ОАО «Пигмент» до Троицко-Дубравского гидроузла (рис. 4.16). Река Цна по классификации Огиевского относится к 3-й категории и имеет хозяйственно-питьевое назначение.

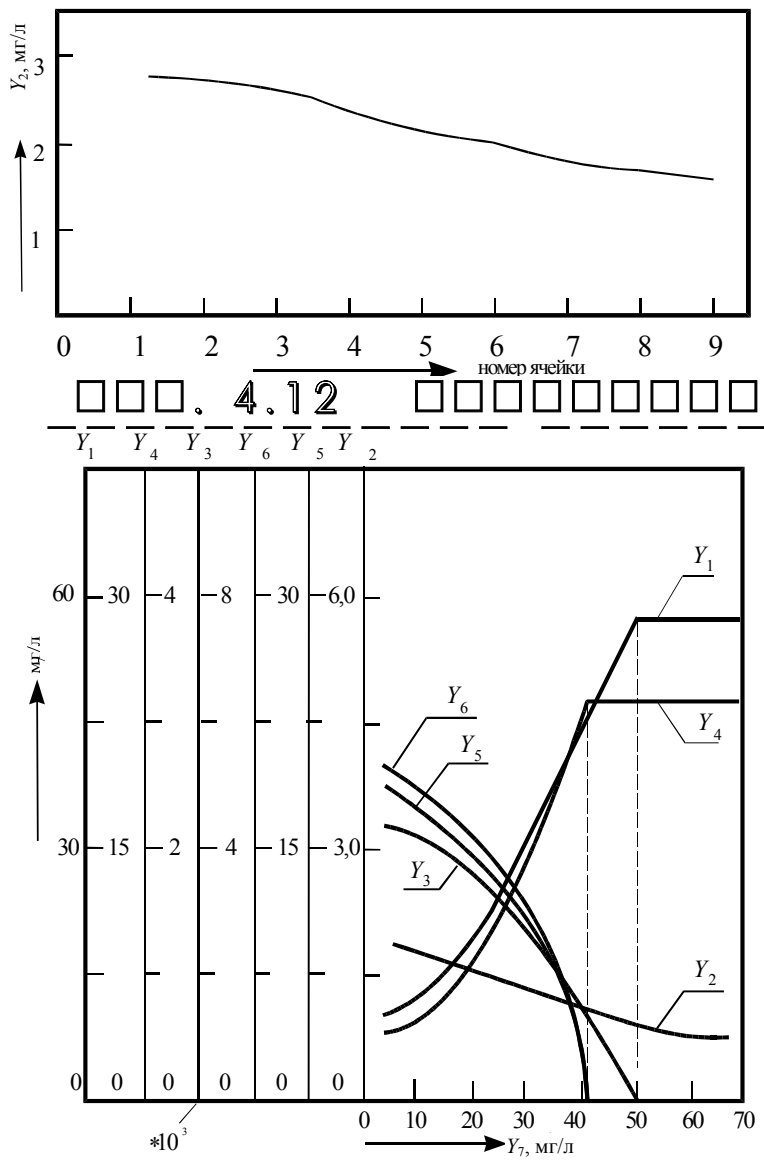


Рис. 4.13 Иллюстрация срыва процесса биохимической очистки в результате ступенчатого изменения концентрации ингибитора во входном потоке

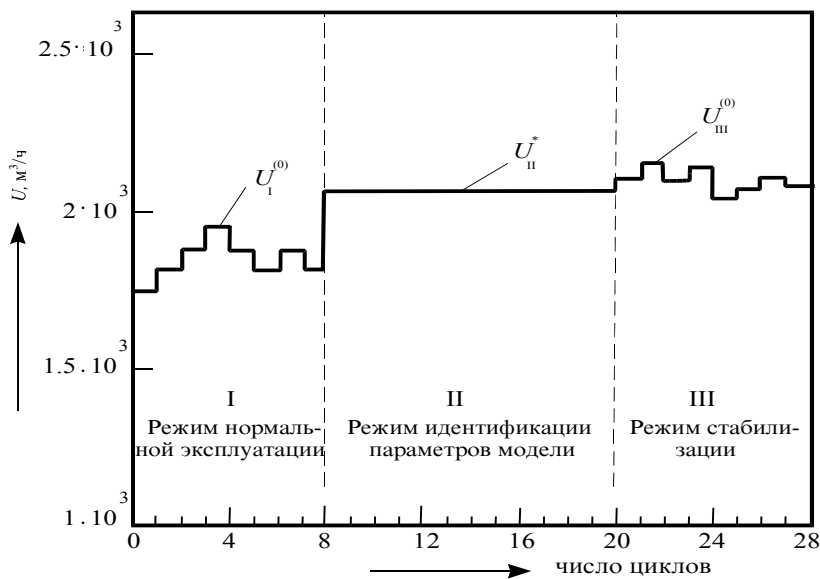
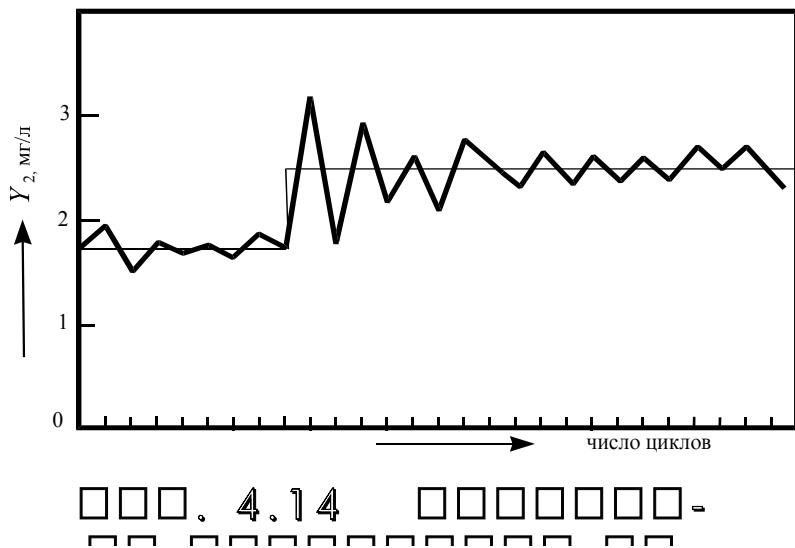


Рис. 4.15 Диаграмма изменения управляемых воздействий

Для исследуемого участка характерно следующее: среднегодовой расход – $12,3 \text{ м}^3/\text{с}$, русло умеренно извилистое шириной $45 \dots 60 \text{ м}$, песчано-илистое, деформирующееся, незначительно заросшее водной растительностью. Прилагаемая местность – наклонная равнина, по левобережью открытая, по правобережью поросшая лесом. По берегам реки расположены населенные пункты, местные водозаборы, садово-огородные общества, использующие воду, зоны отдыха трудящихся. В связи с тем, что на участке имеются два гидроузла и несколько притоков, при моделировании разобьем его на 6 участков с относительно постоянными гидрохимическими параметрами. Схематично они изображены на рис. 4.16.

В результате исследования процессов, протекающих в реке, были выделены процессы аэробного окисления органики, нитрификации, денитрификации, роста и отмирания планктона, деаэрации воды кислородом воздуха, аммонификации белка и мочевины, ионного обмена и другие. В качестве «кандидата» модели для проведения имитационного испытания использована модель (3.47) – (3.61).

Формирование ограничений на выходные переменные модели вида (3.7) – (3.10) и определение диапазонов изменения начальных состояний и внешних воздействий (смывы органики с полей) осуществлялись на основе информации Центрально-Черноземной региональной, городской и заводской (ОАО «Пигмент») гидрохимических лабораторий с учетом полевых измерений концентраций аммонийного и нитратного азота, а также растворенного кислорода в сечениях А, Б, В, выполненных с помощью передвижной лаборатории контроля качества поверхностных вод. В тех случаях, когда информация носила качественный характер, ее преобразование в количественную форму осуществлялось с помощью фор-

мул (3.11) – (3.15). Часть ограничений (3.7) – (3.10) проиллюстрирована на рис. 4.16 и 4.17.

При решении системы уравнений модели в ходе имитационного испытания суммарный интервал времени для всего участка длиной 60 км составил 10 дней. Значения коэффициентов модели выбирались из диапазонов их «правдоподобных» значений. На рис. 4.18, а начальные диапазоны изменения коэффициентов отмечены под числовой осью. Характер изменения выходных переменных при определенных значениях коэффициентов и начальных условий (см. табл. 4.7) приведен на рис. 4.17. При отыскании «правдоподобных» диапазонов коэффициентов было выполнено несколько пробных серий решений системы уравнений. На рис. 4.18, а для коэффициента штриховкой под числовой осью отмечен «правдоподобный» диапазон. «Допустимые» реакции с значениями в пределах него образуют пустое множество.

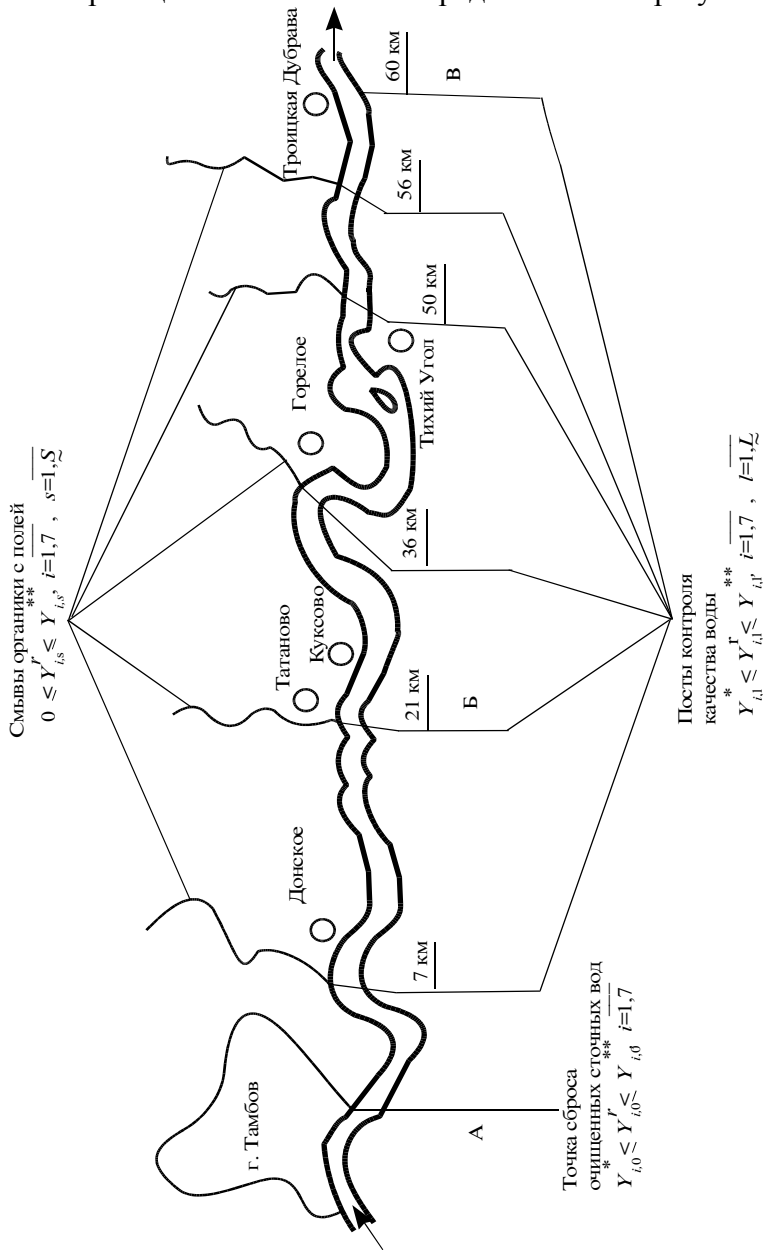


Рис. 4.16 Схема участка реки Цны

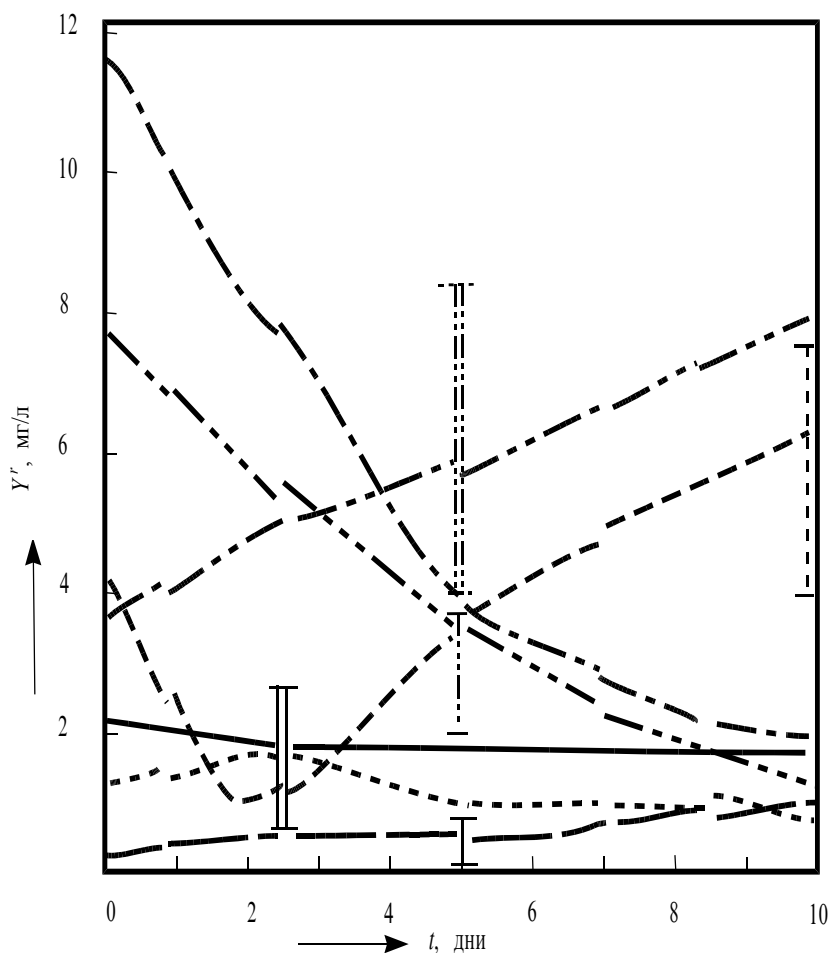


Рис. 4.17 Характер изменения выходных переменных модели:
 - - - - - ПК; - - - - азот органических соединений; - - - - аммонийный азот;
 - · - · - нитратный азот; - - - - растворенный кислород; — — хром;
 · - - · - фосфор; —|— четкие ограничения; —|— нечеткие ограничения

Для окончательного выяснения диапазонов изменения коэффициентов было проведено 9300 решений системы уравнений, в 10 % из них получены решения, удовлетворяющие ограничениям. В табл. 4.7 приведены диапазоны изменения всех коэффициентов модели, а на рис. 4.18, а — коэффициентов, показанные штриховкой над числовой осью. Из этого рисунка видно, что для одних коэффициентов «допустимые» реакции получены во всем предполагаемом диапазоне, для других — он был назначен с большим «запасом».

Все семейство кривых изменения во времени образует некоторую область. На рис. 4.19 изображены области изменения концентраций растворенного кислорода для всех реакций модели и реакций, удовлетворяющих ограничениям, а также гистограммы. На рис. 4.18, б показаны гистограммы значений отдельных коэффициентов для «допустимых» реакций модели.

В результате проведения имитационного испытания была создана математическая модель исследуемого участка реки Цны, удовлетворяющая всем имеющимся экспериментальным данным. Затраты машинного времени на идентификацию модели с быстродействием ПЭВМ 10^6 оп/с составили менее двух часов. Для проверки адекватности в июне 1990 года были проведены расчеты по модели и полевые измерения состояния качества воды (концентраций органического, нитратного, аммонийного азота, растворенного кислорода) в сечениях А, Б, В участка реки. Оказалось, что все концентрации, рассчитанные по модели, попадают в 95 %-ный доверительный интервал. При этом, максимальная относительная ошибка по нитратному, аммонийному азоту и растворенному кислороду не превышает 10 %, органическому азоту — 15,8 %.

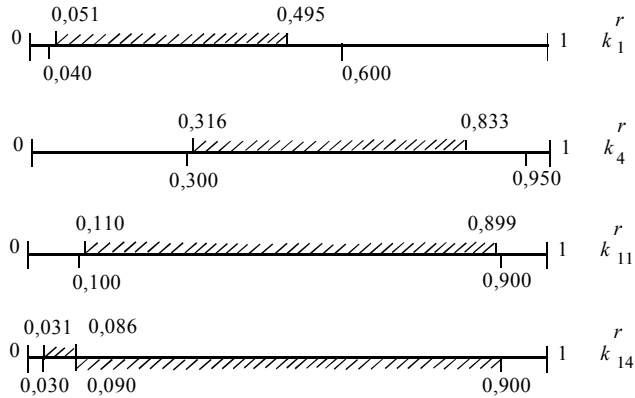
На заключительном этапе исследования участка реки Цны были выполнены прогнозы содержания в воде растворенного кислорода и примесей в зависимости от степени очистки стоков в сечении А на основе следующего правила:

ЕСЛИ

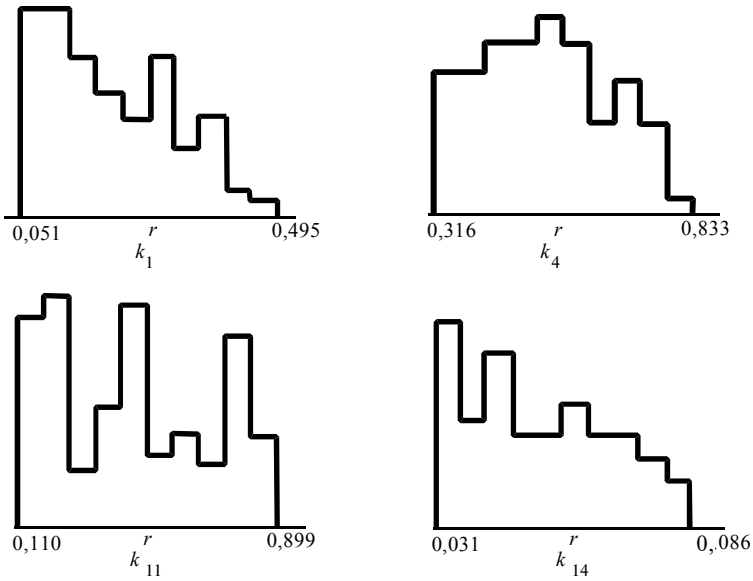
$$\left\{ \left(Y_{1,i0}^r = Y_{1,i0}^{r,зад} \wedge Y_{2,i0}^r = Y_{2,i0}^{r,зад} \wedge \dots \wedge Y_{7,i0}^r = Y_{7,i0}^{r,зад} \right) \bigwedge_{j=1}^{16} \left(k_j = \left\{ k_j^v \in [k_j^H, k_j^B], v = \overline{1, N} \right\} \right) \wedge T = T^{зад} \right\},$$

ТО

$$\left\{ \hat{P}(Y_{1,i}^r \leq Y_{1,i}^{r,lim}) \geq \delta_{Y_{1,i}}^i \wedge \hat{P}(Y_{2,i}^r \leq Y_{2,i}^{r,lim}) \geq \delta_{Y_{2,i}}^i \wedge \hat{P}(Y_{3,i}^r \leq Y_{3,i}^{r,lim}) \geq \delta_{Y_{3,i}}^i \wedge \right. \\ \left. \wedge \hat{P}(Y_{4,i}^r \leq Y_{4,i}^{r,lim}) \geq \delta_{Y_{4,i}}^i \wedge \hat{P}(Y_{5,i}^r \geq Y_{5,i}^{r,lim}) \geq \delta_{Y_{5,i}}^i \wedge \hat{P}(Y_{6,i}^r \leq Y_{6,i}^{r,lim}) \geq \delta_{Y_{6,i}}^i \wedge \right. \\ \left. \wedge \hat{P}(Y_{1,i}^r \leq Y_{1,i}^{r,lim}) \geq \delta_{Y_{1,i}}^i \right\}$$



a)



б)

Рис. 4.18 Исходные данные и найденные в ходе испытания модели диапазоны изменения (а) и гистограммы (б) значений коэффициентов k_1^r , k_4^r , k_{11}^r , k_{14}^r

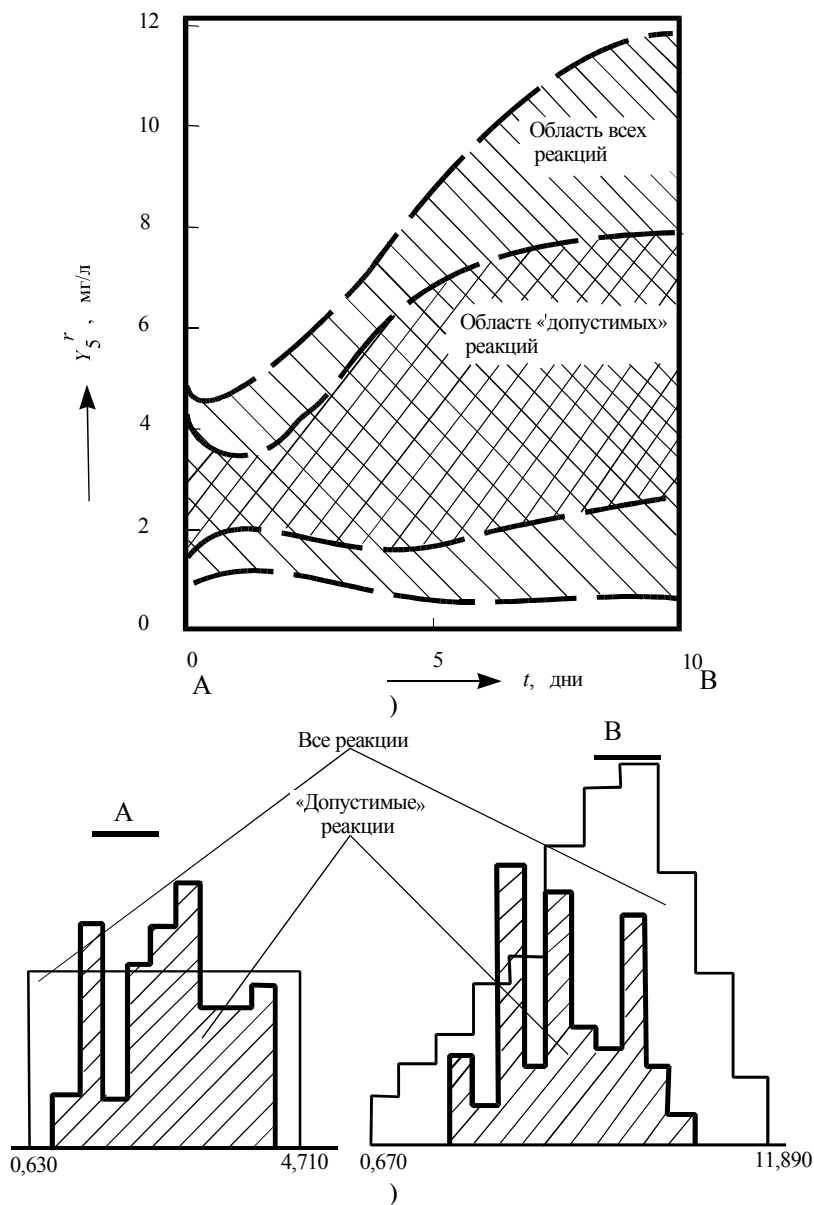


Рис. 4.19 Области изменения (а) и гистограммы значений (б) концентраций растворенного кислорода

где $Y_{1,i0}^r, Y_{2,i0}^r, \dots, Y_{7,i0}^r, T^{\text{зад}}$ – концентрации примесей, растворенного кислорода и температура в i -м створе реки, известные в момент прогноза $t=0$; k_j^H, k_j^B – нижняя и верхняя границы изменения коэффициента $k_j^v, v = \overline{1, N}$; \hat{P} – вероятность; $Y_{1,i0}^{r, \text{зад}}, Y_{2,i0}^{r, \text{зад}}, \dots, Y_{7,i0}^{r, \text{зад}}, T^{\text{зад}}$ – предельно допустимые значения концентраций веществ в речном потоке; $\delta_{Y_{1,i}}^i, \delta_{Y_{2,i}}^i, \dots, \delta_{Y_{7,i}}^i$ – расчетные значения вероятностей; N – количество случайных значений коэффициента k_j .

4.7 Диапазоны изменения всех коэффициентов модели

Параметр	Нижняя граница	Верхняя граница
Начальные условия		
$Y_{1,1}^r$	6,30	7,70
$Y_{2,1}^r$	10,80	13,20

$Y_{3,1}^r$	0,90	1,10
$Y_{4,1}^r$	33,60	4,40
$Y_{5,1}^r$	3,95	4,95
$Y_{6,1}^r$	0,18	0,23
$Y_{7,1}^r$	1,80	2,20

Коэффициенты

k_1^r	0,051	0,495
k_2^r	0,106	0,682
k_3^r	0,001	0,009
k_4^r	0,316	0,830
k_5^r	0,312	0,896

Продолжение табл. 4.7

Параметр	Нижняя граница	Верхняя граница
Начальные условия		
k_6^r	0,087	0,595
k_7^r	0,134	0,751
k_8^r	0,022	0,099
k_9^r	0,531	1,998
k_{10}^r	0,735	2,667
k_{11}^r	0,110	0,899
k_{12}^r	0,006	0,495
k_{13}^r	0,001	0,059
k_{14}^r	0,031	0,086
k_{15}^r	0,032	0,086
k_{16}^r	0,110	0,660
Внешние воздействия		
$l_{1,1}^r$	1,17	1,25
$l_{2,1}^r$	0,60	0,80
T	19,00	23,00

Гистограммы прогнозируемых концентраций растворенного в воде кислорода приведены на рис. 4.20. Качество воды в контрольном створе реки Цны с вероятностью не менее 0,89 отвечает принятым нормам.

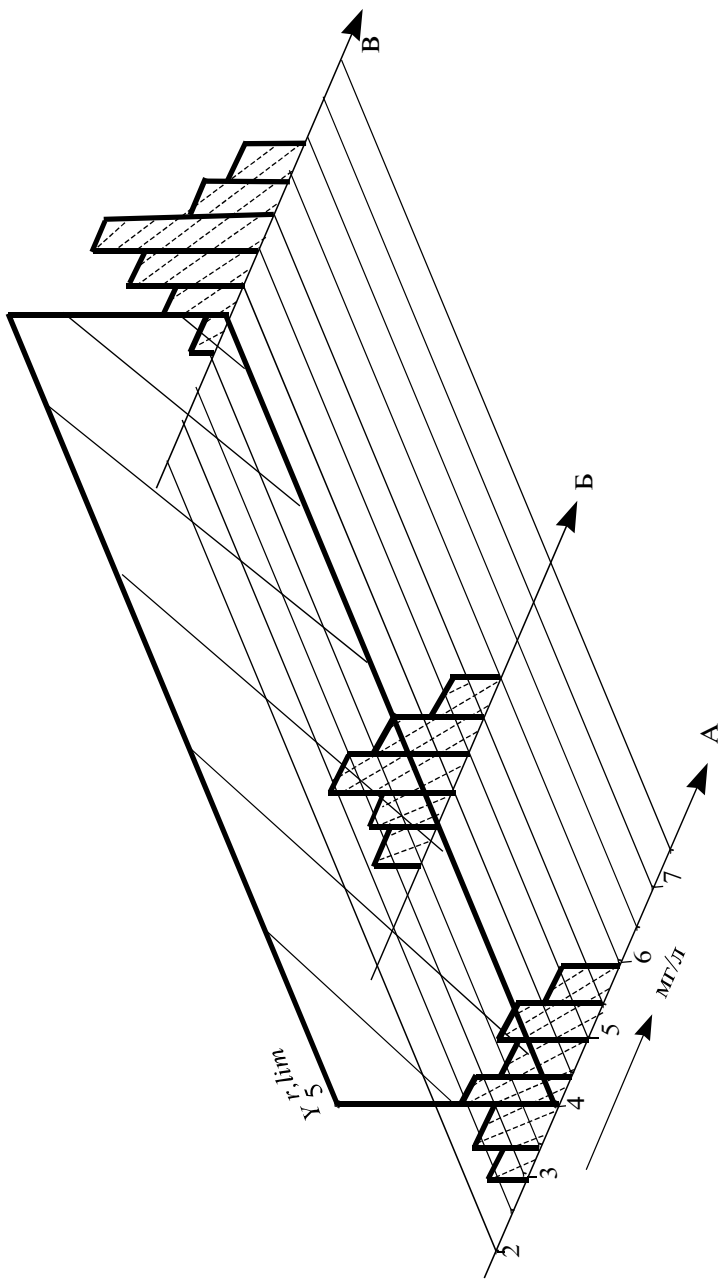


Рис. 4.20 Гистограммы прогнозируемых значений концентрации растворенного кислорода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен подход к решению задачи расчета станций биохимической очистки сточных вод, позволяющий рассмотреть комплекс взаимосвязанных подзадач с позиций теории систем. Были поставлены и решены следующие задачи:

- формирование варианта структуры технологической схемы, в состав которой должны войти все необходимые стадии механической, биохимической очистки и обработки осадка;
- расчет аппаратного оформления для выбранной технологической схемы очистки;
- размещение станции БХО на генплане;
- прогнозирование качества воды в контрольном створе природного водоема (реки).

Использование методики автоматизированного проектирования станций БХО для производственных технологических систем, предложенной авторами, позволит проектировщикам, студентам и аспирантам при решении конкретных задач проектирования новых и реконструкции действующих станций рассматривать результаты проектов как с технико-экономических, так и экологических позиций.

Для проверки сохранности водной среды в результате воздействия на нее ПТС предложено использовать математические модели биохимических процессов, протекающих в природном водоеме (реке), а также в типовых сооружениях станции БХО. Приведенная методика идентификации математических моделей позволяет получить модель, адекватно описывающую процессы в реальных объектах при наличии детерминированной и вероятностной информации.

Список литературы

- 1 БЕРТОКС П., РАДД Д. СТРАТЕГИЯ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ. М.: МИР, 1980. 606 С.
- 2 Биологическая очистка производственных сточных вод: Процессы, аппараты и сооружения / С.В. Яковлев, И.В. Скирдов, В.Н. Швецов и др.; Под ред. С.В. Яковлева. М.: Стройиздат. 1985. 208 с.
- 3 Биохимическая кинетика / В.А. Вавилин, В.Б. Васильев, М.Д. Курский и др. Киев: Вища школа, 1977. 262 с.
- 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. С. 394 – 398.
- 5 Вавилин В.А., Васильев В.Б. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. М.: Наука, 1978. 119 с.
- 6 Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды. М.: Экономика, 1985. 120 с.
- 7 Голубовская Э.К. Биологические очистки сточных вод. М.: Высшая школа, 1978. 186 с.
- 8 Гордин И.В. Технологические системы водообработки. Динамическая оптимизация. Л.: Химия, 1987. 287 с.
- 9 Гордин И.В., Манусова Н.Б., Смирнов Д.Н. Оптимизация химико-технологических систем очистки сточных вод. Л.: Химия, 1977. 176 с.
- 10 Зайцев И.Д. Теория и методы автоматизированного проектирования химических производств. Киев: Наукова думка, 1981. 308 с.
- 11 Йодан Э. Структурное проектирование и конструирование программ. М.: Мир, 1979. 416 с.
- 12 Каинума М., Харасава Х., Найто М. О выборе структуры процесса очистки сточных вод // Канке гидзюцу. 1986. Т. 15. № 10. С. 803 – 811.
- 13 Каталог типовой проектной документации для строительства зданий и сооружений канализации. М., 1991. 507 с.
- 14 Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. М.: Химия, 1985. 320 с.
- 15 Кафаров В.В. Принципы создания безотходных химических производств. М.: Химия, 1982. 432 с.
- 16 Кафаров В.В., Винаров А.Ю., Гордеев Л.С. Моделирование и системный анализ биохимических производств. М.: Лесная промышленность, 1985. 280 с.
- 17 Кирпатовский И.П. Охрана природы: Справочник для работников нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. М.: Химия, 1980. 376 с.

- 18 Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1978. 831 с.
- 19 Кузин В.Д. Основы кибернетики. М.: Энергия, 1973. Т. 1. 504 с.
- 20 Ласков Ю.М., Воронов Ю.В., Калицун В.Н. Примеры расчетов канализационных сооружений. М.: Стройиздат, 1980. 334 с.
- 21 Лурье Ю.Ю., Рыбникова А.И. Химический анализ производственных сточных вод. М.: Химия, 1974. 336 с.
- 22 Малыгин Е.Н., Немтинов В.А., Егоров С.Я. Автоматизированный синтез сооружений биохимической очистки сточных вод // Теоретические основы химической технологии. 2002. № 2. С. 185 – 193.
- 23 Малыгин Е.Н., Немтинов В.А. Автоматизированное проектирование на основе системного подхода // Экология и промышленность России. 2001. № 5. С. 36 – 40.
- 24 Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 320 с.
- 25 Математические модели контроля загрязнения воды / Под ред. А. Джеймса. М.: Мир, 1981. 472 с.
- 26 Методика технологического контроля работы очистных сооружений городской канализации. М.: Стройиздат, 1977. 303 с.
- 27 Минаков И.П., Рафалович И.И., Тимощук В.С. Использование ЭВМ при проектировании генеральных планов и объемно-планировочных решений. Л.: Наука, 1982. 226 с.
- 28 Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М.: Наука, 1982. 286 с.
- 29 Найдено В.В., Кулакова А.П., Скирдов И.В. Методы оптимального проектирования систем очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 1984. № 1. С. 24 – 28.
- 30 Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Под ред. Р. Ягера. М.: Радио и связь. 1986. 408 с.
- 31 Охрана окружающей среды. Модели управления чистотой природной среды / Под ред. К.Г. Гофмана и А.А. Гусева. М.: Экономика, 1977. 231 с.
- 32 Оценка эффективности природоохранных мероприятий на химических предприятиях / Е.Н. Малыгин, В.А. Немтинов, В.Г. Мокрозуб и др. // Химическая промышленность. 1989. № 12. С. 943 – 944.
- 33 Очистка производственных сточных вод / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков и др. М.: Стройиздат, 1979. 320 с.
- 34 Попов Н.С., Немтинов В.А., Мокрозуб В.Г. Методика автоматизированного моделирования процессов самоочищения реки с малым расходом воды в условиях неопределенности // Химическая промышленность. 1992. № 9. С. 545 – 550.
- 35 Попов Н.С., Бодров В.И., Перов В.П. Моделирование процессов загрязнения водной среды за рубежом // Химическая промышленность за рубежом. 1984. № 3. С. 28 – 45.
- 36 Попов Н.С., Немтинов В.А. Система автоматической аварийной защиты и управления станцией биохимической очистки сточных вод // Автоматизация и роботизация химических производств: Межвузовский сб. науч. тр. М., 1989. С. 61 – 66.
- 37 Попов Н.С., Немтинов В.А., Мокрозуб В.Г. Методика автоматизированного моделирования процессов самоочищения реки с малым расходом воды в условиях неопределенности // Химическая промышленность. 1992. № 9. С. 545 – 550.
- 38 Попов Н.С., Немтинов В.А., Толстых С.С. Методика идентификации математической модели реки с малым расходом для целей прогноза // Охрана от загрязнения сточными водами водоемов бассейнов внутренних морей: Тез. докл. Всесоюз. конф. Тбилиси, 1987. С. 51 – 53.
- 39 Попов Н.С., Толстых С.С. Расчет азротенков с рассредоточенной подачей воды и рециркуляцией активного ила / Тамб. ин-т хим. машиностр. Тамбов, 1985. 36 с. Деп. в ИНИИТЭХИМ 20.06.85, № 613 XII-85 Деп.
- 40 Праг Керри Н., Ирвин Мишель Р. Access 97. Библия пользователя. Киев: Диалектика, 1997. 564 с.
- 41 Проблема составления структурных схем потоков при проектировании систем очистки газообразных выбросов / В.А. Немтинов, В.Г. Мокрозуб, С.Я. Егоров и др. // Динамика систем, механизмов и машин. Тез. докл. 3-й Междунар. конф. Омск: ОмГТУ. 1999. С. 402 – 403.
- 42 Прогнозирование режимов функционирования реконструируемых станций биологической очистки / И.В. Гордин, Н.С. Попов, В.А. Немтинов и др. // Теоретические основы химической технологии.

1988. № 6. С. 803 – 809.

- 43 Разработка прототипа экспертной системы выбора оптимальной структуры процесса очистки сточных вод / В.А. Немтинов, В.Г. Мокрозуб, С.Я. Егоров и др. // Компьютерные технологии в науке, проектировании и производстве: Тез. докл. Всерос. конф. Н. Новгород, 1999. Ч. II. С. 26 – 27.
- 44 Родзиллер И.Д. Прогноз качества воды водоемов – приемников сточных вод. М.: Стройиздат, 1984. 263 с.
- 45 Смирнов Д.И., Дмитриев А.С. Автоматизация процесса очистки сточных вод химической промышленности. М.: Химия, 1972. 166 с.
- 46 СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения / Издание официальное. М.: Госстрой СССР, 1986. 124 с.
- 47 СНиП II-89-80. Генеральные планы промышленных предприятий / Издание официальное. М.: Госстрой СССР, 1980. 168 с.
- 48 Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 112 с.
- 49 Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. М.: Мир, 1973. 957 с.
- 50 Яковлев С.В., Карюхина Т.А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. М.: Стройиздат 1980. 200 с.
- 51 *A HIERHICAL OPTIMIZATION OF A WIDE REGION WATER SUPPLY SYSTEM WITH TRANSPORT LAGS / A. OHSATO, T. SEKINGCHI, S. SAITO, H. KODATE // PREPRINTSSS OF IFAC SYMPOSIUM ON WATER AND RELATED LAND RESOURSE SYSTEMS. 1980. P. 57 – 66.*
- 52 Anderson H.M., Edwarg R.W. A finite differring scheme for the dynamic simulation of continuous sedimentation // AIChE Symposium Sers. Water-80. 1980. V. 77. N 209. P. 981 – 997.
- 53 Bedford K.W., Sykes R.M., Libiski C. // J. of Env. Eng. 1983. V. 109. N 3. P. 535 – 554.
- 54 Cristensen M.H. Biological denitrification of sewage: A literature review // Progr. Wat. Tech., Pergamon Press. 1977. V. 8. N 4/5. P. 509 – 551.
- 55 Effects of Deposit Resuspension of Setting Basin / T. Takamatsu, M. Naito, S. Shiba and others // J. of the Env. Eng. Div., Proc. of ASCE. 1974. V. 100. N 4. P. 883 – 903.
- 56 Goodwin G.C., Sin K.S. Adaptive Filtering Production and Control. N.-Y.: Prentice-Hall., 1984. 246 p.
- 57 Hashimoto S., Furukawa K. Crowh Kinetic Studies on Organic Oxidation and Nitrification by Activated Sludge // J. Ferment. Tecnol. 1982. V. 60. N 6. P. 525 – 536.
- 58 Hashimoto S., Furukawa K. Kinetic Studies on Activated Sludge Denitrification // J. Ferment. Tecnol. 1982. V. 60. N 6. P. 537 – 544.
- 59 Jorgensen S.E. // Modeling Identification and Control in Environmental Systems; North-Holland Publ. Comp. 1978. P. 473 – 500.
- 60 Kodate H., Nakayama R., Shimizu T. An algorithm on optimal operation of activated sluge systems // Wat. Sci. Tech. 1981. V. 13. N 9. P. 147 – 152.
- 61 Malygin E., Nemtinov V., Nemtinova Yu. Construction Principles of the System for Solving Industrial Ecology Problems // Transactions of the Tambov State Technical University. 2001. V. 7. N 2. P. 205 – 212.
- 62 Ortego R., Lozano-Leal R. A Note on Direct Adaptive Control of Systems with Bounded Disturbances // Automatica. 1987. V. 23. N 2. P. 253 – 254.
- 63 Painter H.A. A review of literature on inorganic nitrogen metabolism in microorganism // Water Res. 1970. N 4. P. 393 – 450.
- 64 Paterson R.B., Denn M.M. Computer – aided Design and Control of Activated Sludge Process // Chem. Eng. J. 1983. N 27. P. 13 – 27.
- 65 Prakasam T., Krup M. Denitrification // J. of Water Pollution Control Federation. 1980. V. 52. N 6. P. 1195 – 1205.
- 66 Zvirin Y., Shinnar R. Interpretation of Internal Tracer Experiments and Local Sojourn Time Distributions // Int. J of Multiphase Flow. 1976. V. 2. N 5/6. P. 495 – 520.
- 67 Об охране окружающей среды: Федеральный закон № 7-ФЗ от 10.01.02.
- 68 Об охране атмосферного воздуха: Федеральный закон № 96-ФЗ от 04.05.99.
- 69 О животном мире: Федеральный закон № 52-ФЗ от 24.04.95.