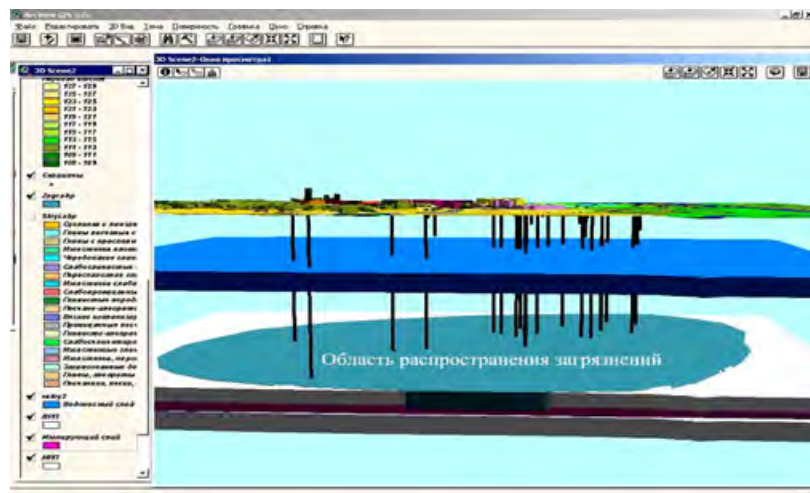


В.А. Немтинов

ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ПРИРОДНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ СИСТЕМЫ



МОСКВА
«ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1»
2005

В.А. Немтинов

ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ПРИРОДНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ СИСТЕМЫ

МОСКВА

«ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1»

2005

УДК 54.058(075)

ББК Н76я73

И74

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой компьютерных интегрированных систем
РХТУ им. Д.М. Менделеева
А.Ф. Егоров

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

Немтинов В.А.

И74

Информационный анализ и моделирование объектов природно-промышленной системы. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2005. 112 с.

В монографии на примере решения задачи синтеза системы обезвреживания сточных вод промышленных предприятий 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.

Предназначена для специалистов, занимающихся расчетами технологического оборудования по обезвреживанию отходов промышленных производств и моделированием процессов распространения загрязнений в компонентах окружающей среды, а также аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

УДК 54.058(075)

ББК Н76я73

ISBN 5-94275-217-6

© Немтинов В.А., 2005

© «Издательство Машиностроение-1», 2005

Научное издание

НЕМТИНОВ Владимир Алексеевич

ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ И
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ
ПРИРОДНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ
СИСТЕМЫ

Монография

Редактор Т.М. Глинкина

Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынкova

Подписано к печати 18.07.2005.

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

Объем: 6,51 усл. печ. л.; 6,30 уч.-изд. л.

Тираж 400 экз. С. 517^М

«Издательство Машиностроение-1»,
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Подготовлено к печати и отпечатано в Издательско-полиграфическом центре
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 над 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 экономичности проектов, 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 технических 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 зависимости:

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

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 завершенных работ по охране природы и оздоровлению окружающей природной среды.

Выполнение этих требований во многом зависит от решения задач расчета аппаратного 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. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СИНТЕЗА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В связи с возросшими требованиями по сохранению окружающей среды при размещении проектируемых ПТС наряду с экономической целесообразностью во главу угла ставится их экологическая безопасность. Под экологической безопасностью ПТС следует понимать запроектированный комплекс мероприятий, направленный на уменьшение вероятности отклонения переменных состояния экосистем от их номинальных значений в период нормального функционирования производств.

При размещении ПТС возникает необходимость погружения данной задачи в более общий класс задач оптимизации природно-промышленных систем (ППС). ППС назовем множество объектов отраслей промышленного производства и объектов природной среды, образующих единую технико-экономическую и экологическую структуру рассматриваемого района, упорядоченно взаимодействующую

щих друг с другом в процессах обмена информацией, потребления материально-энергетических ресурсов и переработки отходов.

Рассмотрим методологию синтеза объектов ППС на примере синтеза системы очистки сточных вод ПТС.

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 биохимическое потребление кислорода 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 кон-

центрированных 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, характеризующийся 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-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,

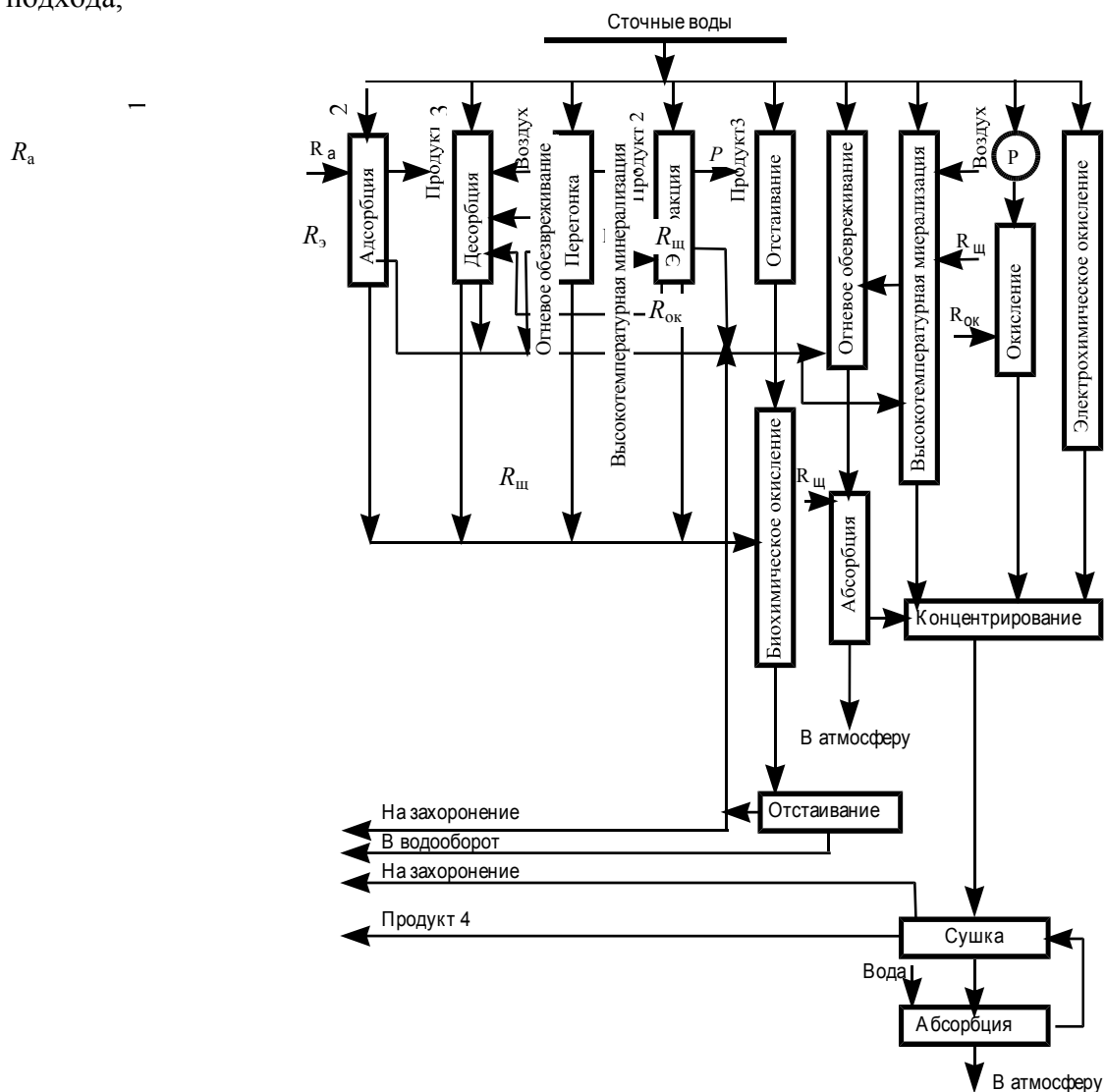


Рис. 1.1. Схема переработки и обезвреживания сточных вод, содержащих органические соединения:

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

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 аппаратного 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 заключение 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 при-

родного 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.

Исходя из традиций выполнения проектных работ, задачу синтеза системы очистки сточных вод ПТС можно представить в виде целостной системы. Формирование этой системы должно вестись в соответствии с принципами теории систем [28]. Для рассматриваемого класса задач эти принципы формулируются следующим образом: комплексное решение задачи промышленной экологии для ПТС на расширенном пространстве переменных состояния ППС; приоритет экологических закономерностей развития ППС перед технико-экономическими на этапе формализации задач; гарантированная экологическая безопасность принимаемых решений; иерархичность структуры системы, объединяющей весь комплекс локальных задач промышленной экологии; координируемость локальных задач относительно задач вышестоящего уровня; совместимость целей, стоящих перед рассматриваемыми задачами, и модифицируемость множества задач для обеспечения совместимости и координируемости.

В данной работе комплекс задач синтеза системы очистки сточных вод ПТС образует многоуровневую структуру, состоящий из последовательности подсистем, объединенных информационными потоками. Результатом решения всего комплекса задач является проектно-техническая документация на системы очистки сточных вод для проектируемых ПТС. При этом должны быть выполнены все требования экологической безопасности территориального района их размещения.

Обозначим общую задачу проектирования сооружений БХО через Z_n . Эта задача включает в себя множество особенно значимых локальных задач: формирование структур технологических схем обезвреживания жидких отходов ПТС; расчет аппаратного оформления этих схем; размещение сооружений очистки сточных вод на генплане, оценка экологического воздействия ПТС на окружающую среду и др. Комплексное решение этих задач, направленное на получение решения задачи Z_n , требует создания сложной иерархической системы проектирования оборудования промышленной экологии, в которую кроме перечисленных задач входят задачи межуровневой координации и задачи, обеспечивающие получение решения в приемлемые сроки (рис. 1.2).

Сформулируем задачу проектирования сооружений БХО для ПТС Z_n математически. Пусть X – множество всех возможных вариантов конструктивных и режимных характеристик оборудования БХО, а также вариантов размещения сооружений на генплане; R – множество вариантов технологических процессов извлечения вредных примесей из сточных водах; V – множество оценок (экологических оценок воздействия ПТС на окружающую среду и технико-экономических оценок целесообразности размещения проектируемых производств в рассматриваемом районе).

Введем функцию F эффективности выбора проектного варианта с учетом его физической реализуемости как отображение декартова произведения $X \times R$ в множество оценок, т.е. $F: X \times R \rightarrow V$, и функцию $Q: R \rightarrow V$. Тогда задачу Z_n можно представить как задачу выбора такого элемента $x^* \in X' \subset X$, при котором

$$F(x^*, r) \text{ } U \text{ } Q(r) \quad (1.1)$$

при любом $r \in R$. Таким образом, x^* является решением задачи Z_n , если при $r \in R$ оценка эффективности $F(x^*, r)$ находится в отношении U к предельной для этого r величине $Q(r)$. В соотношении (1.1) X' – множество допустимых вариантов проектных решений.

Задача Z_n характеризуется набором (X', R, F, Q) , элемент x из X' , удовлетворяющий (1.1), является решением задачи Z_n , что будем характеризовать предикатом $P(x^*, Z_n)$

$$P(x^*, Z_n) \equiv (x^* \text{ есть решение } Z_n). \quad (1.2)$$

Задача Z_n является задачей проектирования оборудования промышленной экологии для вновь создаваемых ПТС. В рассматриваемом классе производств нередко возникает необходимость замены выпускаемого ассортимента продукции на новый ассортимент при условии максимального использования для его наработки оборудования существующей технологической схемы (ТС). В этом случае возможна минимальная замена оборудования существующих ТС (основного производства и производства по обезвреживанию отходов) и поиск режимов их работы – задача реконструкции, чтобы было возможно выпускать в соответствии с требованиями новый ассортимент продукции и не загрязнять окружающую

среду. Определим задачу Z'_n реконструкции объектов БХО, как сужение задачи Z_n на множестве $X'' \subset X'$.

Аналогично можно охарактеризовать задачи формирования структуры технологической схемы очистки сточных вод Z_{1v} , расчета ее аппаратного оформления Z_{2v} , размещения сооружений очистки сточных вод на генеральном плане Z_{3v} . Задачи Z_{ij} ($i \in \{1, 2, 3\}$, $j \in N_1 \cup N_2 \cup N_3$) также могут быть сформулированы в виде (1.1) и охарактеризованы наборами $(X_{ij}, R_{ij}, F_{ij}, Q_{ij})$. Общее число задач Z_{ij} равно $N_1 \cup N_2 \cup N_3$.

Обозначим вектором $S_{1v} = (x_{11}, \dots, x_{1N_1})$ совокупность решений задач Z_{1j} , $j = \overline{1, N_1}$. Очевидно, при определении S_{1v} будут определены $x_{1v} \in X_{1v}$ и этот факт будем характеризовать оператором Θ_{1v} :

$$x_{1v} = \Theta_{1v}(S_{1v}). \quad (1.3)$$

Аналогичные рассуждения будут иметь место и при определении локальных задач в задаче определения аппаратного оформления системы очистки сточных вод и задаче размещения сооружений на генплане.

Используя введенные обозначения, формализуем основные принципы автоматизированного решения задач промышленной экологии.

Комплексное решение задачи промышленной экологии для ПТС на расширенном пространстве переменных состояния ППС. Другими словами – при решении задач Z_{1v} , Z_{2v} и Z_{3v} должен формироваться вектор S_n , который порождает бы решение задачи Z_n , сводящий к минимуму негативное экологическое воздействие на окружающую среду от размещения проектируемых ПТС. В свою очередь, при решении задач нижестоящего уровня, например задач Z_{1j} , $j = \overline{1, N_1}$ должен формироваться вектор S_{1v} , который порождает бы решение задачи Z_{1v} . В формализованном виде это можно записать так:

$$\begin{aligned} & \exists (Z_{1j}, x_{1j}, j = \overline{1, N_1}) : P(x_{1j}, Z_{1j}) \Rightarrow \\ & P(x_{1v}, Z_{1v}) \left| \begin{array}{l} x_{1v} = \Theta_{1v}(S_{1v}) \\ S_{1v} = (x_{11}, \dots, x_{1N_1}) \end{array} \right. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Более частым является достижение экстремума некоторой целевой функции F_{1v} , определенной на множестве $H_{1v} = \{x_{1v} | P(x_{1v}, Z_{1v})\}$ решений задачи Z_{1v} . В этом случае вместо (1.4) имеем:

$$\begin{aligned} & \exists (Z_{1j}, x_{1j}, j = \overline{1, N_1}) : P(x_{1j}, Z_{1j}) \Rightarrow \\ & \exists (S_{1v}^* = (x_{11}^*, \dots, x_{1N_1}^*), x_{1j}^* = \{x_{1j}\}, j = \overline{1, N_1}) : \\ & F_{1v}(\Theta_{1v}(S_{1v}^*)) = \text{extr}_{x \in H_{1v}} F_{1v}(x_{1v}). \end{aligned} \quad (1.5)$$

Условия, аналогичные (1.4) и (1.5), имеют место и в задачах Z_{2v} , Z_{3v} и более высокого уровня.

Решение задач промышленной экологии должно вестись в соответствии с принципами общей теории систем, т.е. система автоматизированного расчета должна удовлетворять принципам иерархичности структуры, координации локальных задач относительно задач вышестоящего уровня, совместимости и модифицируемости. Рассмотрим эти принципы.

Иерархичность структуры. В терминах теории систем систему Θ автоматизированного решения комплекса задач промышленной экологии (см. рис. 1.2) можно представить как отношение на декартовом произведении множеств:

$$\begin{aligned} \Theta \subset & R \times M_{1v} \times M_{2v} \times M_{3v} \times D_{1v} \times D_{2v} \times D_{3v} \times \\ & \times W_{1v} \times W_{2v} \times W_{3v} \times \Gamma_{1v} \times \Gamma_{2v} \times \Gamma_{3v} \times L_{1v} \times L_{2v} \times L_{3v} \times \\ & \times P_{1v} \times P_{2v} \times P_{3v} \times \{x_{1j} | j \in N_1\} \times \{x_{2j} | j \in N_2\} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \{ \times Z_{3j} \mid j \in N_3 \} \times \{ Z_{1v} \} \times \{ Z_{2v} \} \times \{ Z_{3v} \} \times \\
& \times \{ Z_n \} \times \{ \times \Theta'_{1j} \mid j \in N_1 \} \times \{ \times \Theta'_{2j} \mid j \in N_2 \} \times \{ \times \Theta'_{3j} \mid j \in N_3 \} \times \\
& \times \{ \times \Theta''_{1j} \mid j \in N_1 \} \times \{ \times \Theta''_{2j} \mid j \in N_2 \} \times \{ \times \Theta''_{3j} \mid j \in N_3 \} \times \\
& \times \{ \Theta_{1v} \} \times \{ \Theta_{2v} \} \times \{ \Theta_{3v} \} \times \{ III \} \times \{ \text{Пр} \},
\end{aligned} \tag{1.6}$$

где $\{\text{Пр}\}$ – множество проектных решений задачи синтеза сооружений БХО; M_{1v}, M_{2v}, M_{3v} – множества управляющих сигналов для процесса проектирования в задачах расчета оборудования по очистке сточных вод нижнего уровня, например, расходы входных потоков веществ, подлежащих обезвреживанию, характеристики загрязняющих веществ (концентрации, температура и т.п.), периодичность и продолжительность воздействия на окружающую среду и другие; $D_{1v}, D_{2v}, D_{3v}, W_{1v}, W_{2v}, W_{3v}, P_{1v}, P_{2v}, P_{3v}$ – множества информационных сигналов о решении локальных задач, например, технологические процессы очистки сточных вод; типы, размеры и координаты аппаратов и сооружений; планы зон воздействия ПТС с указанием промышленных, селитебных и других типов территорий; величины критериев локальных задач оптимизации и другие; $\Gamma_{1v}, \Gamma_{2v}, \Gamma_{3v}, L_{1v}, L_{2v}, L_{3v}$ – множества координирующих сигналов для локальных задач нижестоящих уровней, например, фоновые концентрации вредных ингредиентов в поверхностных водоемах района размещения ПТС; категория использования и самоочищающая способность водных объектов; преобладающие типы и подтипы почв, их распределение в зоне возможного размещения производств; длительности отдельных технологических процессов очистки, структура связей между аппаратами и сооружениями и др.

$$\begin{aligned}
M_{1v} &= \{ \times M_{1j} \mid M_{1j} = \{ m_{1j} \}, j \in N_1 \}; \\
M_{2v} &= \{ \times M_{2j} \mid M_{2j} = \{ m_{2j} \}, j \in N_2 \}; \\
M_{3v} &= \{ \times M_{3j} \mid M_{3j} = \{ m_{3j} \}, j \in N_3 \}; \\
D_{1v} &= \{ \times D_{1j} \mid D_{1j} = \{ d_{1j} \}, j \in N_1 \}; \\
D_{2v} &= \{ \times D_{2j} \mid D_{2j} = \{ d_{2j} \}, j \in N_2 \}; \\
D_{3v} &= \{ \times D_{3j} \mid D_{3j} = \{ d_{3j} \}, j \in N_3 \}; \\
W_{1v} &= \{ \times W_{1j} \mid W_{1j} = \{ w_{1j} \}, j \in N_1 \}; \\
W_{2v} &= \{ \times W_{2j} \mid W_{2j} = \{ w_{2j} \}, j \in N_2 \}; \\
W_{3v} &= \{ \times W_{3j} \mid W_{3j} = \{ w_{3j} \}, j \in N_3 \}; \\
\Gamma_{1v} &= \{ \times \Gamma_{1j} \mid \Gamma_{1j} = \{ \gamma_{1i} \}, j \in N_1 \}; \\
\Gamma_{2v} &= \{ \times \Gamma_{2j} \mid \Gamma_{2j} = \{ \gamma_{2j} \}, j \in N_2 \}; \\
\Gamma_{3v} &= \{ \times \Gamma_{3j} \mid \Gamma_{3j} = \{ \gamma_{3j} \}, j \in N_3 \}; \\
P_{1v} &= \{ p_{1v} \}; \quad P_{2v} = \{ p_{2v} \}; \quad P_{3v} = \{ p_{3v} \}; \\
L_{1v} &= \{ l_{1v} \}; \quad L_{2v} = \{ l_{2v} \}; \quad L_{3v} = \{ l_{3v} \}.
\end{aligned}$$

Введем определения задач, решаемых в системе, следующим образом:

– для задач нижнего уровня $Z_{ij} : R \times \Gamma_{ij} \times D_{ij} \rightarrow M_{ij}$,

$i \in \{1, 2, 3\}, j \in N_1 \cup N_2 \cup N_3$;

– для задачи формирования структуры технологической схемы очистки сточных вод $Z_{1v} : R \times L_{1v} \times \{ \times W_{1j} \mid j \in N_1 \} \rightarrow \{ \times \Gamma_{1j} \mid j \in N_1 \}$;

– для задачи расчета аппаратного оформления технологической схемы очистки сточных вод $Z_{2v} : R \times L_{2v} \times \{ \times W_{2j} \mid j \in N_2 \} \rightarrow \{ \times \Gamma_{2j} \mid j \in N_2 \}$;

– для задачи размещения сооружений по очистке сточных вод на генеральном плане $Z_{3v} : R \times L_{3v} \times \{ \times W_{3j} \mid j \in N_3 \} \rightarrow \{ \times \Gamma_{3j} \mid j \in N_3 \}$;

– для задачи верхнего уровня $Z_n : R \times P_{1v} \times P_{2v} \times P_{3v} \rightarrow L_{1v} \times L_{2v} \times L_{3v}$.

Определим: $\{\text{ПП}\}$ – множества операторов процесса проектирования (множества математических моделей нижнего уровня: процессов очистки сточных вод и самоочищения в природных водоемах) $\text{ПП} : R \times M_{1v} \times M_{2v} \times M_{3v} \rightarrow \{\text{Пр}\}$;

$\Theta'_{ij} = \{\theta'_{ij}\}$, $i \in \{1, 2, 3\}$, $j \in N_1 \cup N_2 \cup N_3$ – множества операторов формирования информационных сигналов от процесса проектирования к нижнему уровню иерархической системы для задач Z_{ij}
 $\theta'_{ij} : R \times \{M_{1j} | j \in N_1\} \times \{M_{2j} | j \in N_2\} \times \{M_{3j} | j \in N_3\} \rightarrow D_{ij}$;

$\Theta''_{ij} = \{\theta''_{ij}\}$, $i \in \{1, 2, 3\}$, $j \in N_1 \cup N_2 \cup N_3$ – множества операторов формирования информационных сигналов от второго уровня иерархии соответственно для задач Z_{ij}

$$\begin{aligned} \theta'_{ij} : R \times \{D_{1j} | j \in N_1\} \times \{D_{2j} | j \in N_2\} \times \{D_{3j} | j \in N_3\} \times \\ \times \{\Gamma_{1j} | j \in N_1\} \times \{\Gamma_{2j} | j \in N_2\} \times \{\Gamma_{3j} | j \in N_3\} \rightarrow W_{ij}. \end{aligned}$$

Аналогичным образом определяются множества операторов формирования информационных сигналов для подсистем вышестоящих уровней.

Координируемость. В соответствии с принципами теории систем, задачи нижестоящего уровня должны быть скоординированы относительно задач вышестоящего уровня. Для формализации этого принципа переопределим операторы Z_{ij} , Z_{1v} , Z_{2v} , Z_{3v} следующим образом:

$$\begin{aligned} \forall \gamma_{ij} \in \Gamma_{ij} : Z_{ij}(\gamma_{ij}) : R \times D_{ij} \rightarrow M_{ij}, i \in \{1, 2, 3\}, \\ j \in N_1 \cup N_2 \cup N_3; \end{aligned} \quad (1.7)$$

$$\begin{aligned} \forall l_{1v} \in L_{1v} : Z_{1v}(l_{1v}) : R \times \{W_{1j} | j \in N_1\} \rightarrow \\ \{ \Gamma_{1j} | j \in N_1 \}; \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned} \forall l_{2v} \in L_{2v} : Z_{2v}(l_{2v}) : R \times \{W_{2j} | j \in N_2\} \rightarrow \\ \{ \Gamma_{2j} | j \in N_2 \}; \end{aligned} \quad (1.9)$$

$$\begin{aligned} \forall l_{3v} \in L_{3v} : Z_{3v}(l_{3v}) : R \times \{W_{3j} | j \in N_3\} \rightarrow \\ \{ \Gamma_{3j} | j \in N_3 \}. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Таким образом, согласно (1.7) – (1.10) операторы $Z_{ij}(\gamma_{ij})$, $Z_{1v}(l_{1v})$, $Z_{2v}(l_{2v})$, $Z_{3v}(l_{3v})$ параметрически зависят от координирующих сигналов γ_{ij} , l_{1v} , l_{2v} , l_{3v} , поступающих с вышестоящих уровней системы автоматизированного расчета оборудования станции БХО.

Координируемость относительно вышестоящего уровня требует, чтобы задачи верхнего уровня и множество задач нижнего уровня имели решение:

$$\begin{aligned} (\forall i \in \{1, 2, 3\} \wedge \forall j \in N_1 \cup N_2 \cup N_3 \exists (\gamma_{ij}, m_{ij}) \wedge \\ \wedge \exists (l_{1v}, l_{2v}, l_{3v}) : [P(m_{ij}, Z_{ij}(\gamma_{ij})) \wedge P(\gamma_{ij}, Z_{1v}(l_{1v})) \wedge \\ \wedge P(\gamma_{ij}, Z_{2v}(l_{2v})) \wedge P(\gamma_{ij}, Z_{3v}(l_{3v})) \wedge P(l_{1v}, l_{2v}, l_{3v}, Z_n)]. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Совместимость. Рассмотрим более подробно особенности рассматриваемой системы расчета оборудования промышленной экологии.

Непосредственный контакт с процессом проектирования (системой моделей аппаратов, структурами ТС очистки сточных вод и т.п.) имеют только нижестоящие задачи. Задачи вышестоящего уровня могут воздействовать на процесс ПП только через задачи нижнего уровня. Поэтому достижение целей глобальной задачи возможно только при координируемости нижестоящих задач относительно глобальной.

Вышестоящая задача Z_n , осуществляя координацию задачи Z_{1v} , Z_{2v} и Z_{3v} , преследует свои цели (достижение максимума эффективности функционирования системы очистки сточных вод в целом). Поэтому задачи, например Z_{2j} , $j \in N_2$, должны быть координируемы и по отношению к задаче Z_n .

Учитывая перечисленные особенности системы для совместимости целей, которые стоят перед рассматриваемыми задачами (см. рис. 1.2), координация нижестоящих задач относительно вышестоящего уровня должна быть связана с глобальной задачей. Поэтому введем оператор f_m , отображающий $l = (l_{1v}, l_{2v}, l_{3v})$ в сигналы, влияющие на процесс проектирования: $f_m : L_{1v} \times L_{2v} \times L_{3v} \rightarrow M_{1v} \times M_{2v} \times M_{3v}$, т.е.

$$(m_{ij}, i \in \{1, 2, 3\}, j \in N_1 \cup N_2 \cup N_3) = f_m(l_{1v}, l_{2v}, l_{3v}).$$

Будем считать известными обратные операторы f_m^{-1} , позволяющие определить l_{1v}, l_{2v}, l_{3v} по (m_{ij}) , т.е.

$$(l_{1v}, l_{2v}, l_{3v}) = f_m^{-1}(m_{ij}, i \in \{1, 2, 3\}, j \in N_1 \cup N_2 \cup N_3).$$

Тогда требование совместимости задач в иерархической системе может быть сформулировано в форме:

$$\begin{aligned} & (\forall i \in \{1, 2, 3\} \wedge \forall j \in N_1 \cup N_2 \cup N_3 \exists (\gamma_{ij}, m_{ij}) \wedge \\ & \wedge \exists (l_{1v}, l_{2v}, l_{3v})) : [P(m_{ij}, Z_{ij}(\gamma_{ij})) \wedge P(m_{1v}, Z_{1v}) \wedge \\ & \wedge P(m_{2v}, Z_{2v}) \wedge P(m_{3v}, Z_{3v})] \Rightarrow [P(m_{ij}, Z_{ij}(\gamma_{ij})) \wedge \\ & \wedge P(f_m^{-1}(m_{ij}, i \in \{1, 2, 3\}, j \in N_1 \cup N_2 \cup N_3), Z_n)]. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Условие (1.12) означает, что задачи Z_{ij} нижнего уровня скорректированы относительно глобальной задачи Z_n тогда, когда они скорректированы относительно задач Z_{1v}, Z_{2v}, Z_{3v} .

Модифицируемость. В случае, когда в многоуровневой системе отсутствует координируемость, задачи нижнего уровня необходимо модифицировать так, чтобы координируемость имела место. Другими словами, требуется найти такие множества координирующих сигналов $\bar{\Gamma}_{1v}, \bar{\Gamma}_{2v}, \bar{\Gamma}_{3v}, \bar{L}_{1v}, \bar{L}_{2v}, \bar{L}_{3v}$, и такие множества задач $\{\bar{Z}_{ij}\}, i \in \{1, 2, 3\}, j \in N_1 \cup N_2 \cup N_3$, а также $\{\bar{Z}_{1v}\}, \{\bar{Z}_{2v}\}, \{\bar{Z}_{3v}\}$, при которых выполняются условия (1.11) и (1.12). Введем предикаты P_1 = (условие (1.11) выполняется) и P_2 = (условие (1.12) выполняется), тогда требование модифицируемости примет вид:

$$\begin{aligned} & \exists (\bar{\Gamma}_{1v} \subseteq \Gamma_{1v}, \bar{\Gamma}_{2v} \subseteq \Gamma_{2v}, \bar{\Gamma}_{3v} \subseteq \Gamma_{3v}, \bar{L}_{1v} \subseteq L_{1v}, \\ & \bar{L}_{2v} \subseteq L_{2v}, \bar{L}_{3v} \subseteq L_{3v}, \\ & \{\bar{Z}_{ij}\} \subseteq \{Z_{ij}\}, i \in \{1, 2, 3\}, j \in N_1 \cup N_2 \cup N_3, \\ & \{\bar{Z}_{1v}\} \subseteq \{Z_{1v}\}, \{\bar{Z}_{2v}\} \subseteq \{Z_{2v}\}, \{\bar{Z}_{3v}\} \subseteq \{Z_{3v}\}) : \\ & (\forall (\gamma_{1v} \in \bar{\Gamma}_{1v}, \gamma_{2v} \in \bar{\Gamma}_{2v}, \gamma_{3v} \in \bar{\Gamma}_{3v}, l_{1v} \in \bar{L}_{1v}, \\ & l_{2v} \in \bar{L}_{2v}, l_{3v} \in \bar{L}_{3v}, Z_{ij} \in \{\bar{Z}_{ij}\}, Z_{1v} \in \{\bar{Z}_{1v}\}, \\ & Z_{2v} \in \{\bar{Z}_{2v}\}, Z_{3v} \in \{\bar{Z}_{3v}\}) \rightarrow [P_1 \wedge P_2]). \end{aligned} \quad (1.13)$$

Условия (1.11) – (1.13) требуют, чтобы исходные множества задач

$$\{Z_{ij}\}, i \in \{1, 2, 3\}, j \in N_1 \cup N_2 \cup N_3, \{Z_{1v}\}, \{Z_{2v}\}, \{Z_{3v}\}$$

были достаточно мощными, чтобы выбором подмножеств этих множеств можно было бы добиться совместимости и координируемости задач в системе.

При проектировании системы уровень формализации отдельных задач синтеза сооружений биохимической очистки определяется наличием сведений: о кинетике протекания процессов обезвреживания вредных ингредиентов в отдельных аппаратах и сооружениях; правилах и приемах принятия решений. Алгоритмы решения взаимосвязанных задач синтеза очистных сооружений должны обеспечивать нахождение решения с точностью, согласованной с точностью исходной информации. Разработка интеллектуального и программного обеспечения на основе системного подхода позволит повысить качество, снизить сроки выполнения и стоимость проектных решений при проектировании оборудования по обезвреживанию сточных вод ПТС.

Подробное описание выше перечисленных задач и алгоритмов их решения приводится в разделах 2 и 3.

2. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАНЦИЙ БИОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ 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 оборудования очистных сооружений очистки сточных на местности при соблюдении ограничений на выходные параметры (концентрации примесей в очищенных водах и др.) по критерию минимума суммы взвешенных относительных потерь критериев: приведенных затрат на реализацию совокупности стадий очистки с учетом экономического ущерба, наносимого окружающей среде сбросом очищенных сточных вод в природные водоемы; надежности функционирования системы очистки и технологичности процессов очистки.

В формализованном виде постановка задачи заключается в поиске минимума целевой функции $F(w)$:

$$w_{\text{opt}} = \arg \min_{w \in W} F(w) \quad (2.1)$$

при выполнении санитарно-экологических ограничений:

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

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

ограничений на показатели функционирования системы:

$$F^l(w) \leq F^{l, \text{zad}}, \quad l = \overline{1, L_1}, \quad (2.4)$$

$$F^m(w) \geq F^{m, \text{zad}}, \quad m = \overline{1, L_2}; \quad (2.5)$$

уравнений связи, представляющих математические модели:

- формирования вариантов структурных схем технологических процессов очистки

$$\overline{M}_1(\overline{C}_{\text{вх}}, \overline{C}_{\text{фон}}, \overline{C}_{\text{вых}}, \overline{q}, \overline{Q}, T) = 0, \quad (2.6)$$

- формирования вариантов аппаратного оформления технологической схемы очистки

$$\overline{M}_2(\overline{C}_{\text{вх}}, \overline{C}_{\text{фон}}, \overline{C}_{\text{вых}}, \overline{Q}, t_{\text{opt}}, R) = 0, \quad (2.7)$$

- формирования вариантов размещения сооружений очистной станции на генплане промышленной площадки

$$\overline{M}_3(r_{\text{opt}}, \Omega) = 0, \quad (2.8)$$

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

$$\overline{M}_4(\overline{C}_{\text{вх}}, \overline{C}_{\text{фон}}, \overline{C}_{\text{вых}}, \overline{Q}, r_{\text{opt}}) = 0, \quad (2.9)$$

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

$$\overline{M}_5(\overline{C}_{\text{вых}}, \overline{C}_{\text{фон}}, \overline{Q}, \Psi) = 0, \quad (2.10)$$

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; 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; $F^l(w)$, $F^m(w)$, $F^{l,zad}$, $F^{m,zad}$ – соответственно значения показателей функционирования w -го варианта системы очистки (надежность, технологичность, безопасность и т.п.) и их заданные значения; L_1 , L_2 – соответственно количества показателей, для которых задаются условия (2.4) и (2.5); 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) – (2.10) относится к классу комбинаторных задач. При такой постановке ее решение невозможно получить в связи с высокой размерностью пространства переменных состояния природно-промышленной системы, сложностью построения математических моделей распространения примесей в воде и т.д. Поэтому для практического решения задачи синтеза сооружений биохимической очистки сточных вод в соответствии с иерархической структурой, приведенной на рис 1.2, заменим ее последовательным рассмотрением подзадач меньшей размерности, имеющих и самостоятельное значение в процессе проектирования:

- формирование варианта структуры технологической схемы (СТС), 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 три большие группы: «затраты», «технологичность», «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 технологических стадий 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 практические наработки специалистов в данной области.

2.2.1. Постановка задачи формирования структуры технологической схемы очистки сточных вод

Исходя из вышеприведенных 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 технологических стадий процессов очистки сточных вод от примесей солей азота и фосфора до требуемых концентраций $\bar{C}_{\text{необх}}$ таких, что при выполнении условий:

$$\bar{C}_{\text{факт}} \leq \bar{C}_{\text{необх}}, \quad q_{\text{нач}} = 0, \quad q_{\text{факт}} \geq q_{\text{необх}} \quad (2.11)$$

справедливо следующее:

$$t_{\text{opt}} = \arg \min_{t \in T} F_1(t) \quad (2.12)$$

при выполнении ограничений на показатели функционирования системы:

$$F_1^1(t) \leq F_1^{1,zad}, \quad F_1^2(t) \geq F_1^{2,zad}, \quad F_1^3(t) \geq F_1^{3,zad}. \quad (2.13)$$

В связи с тем, что предлагается использовать многокритериальный выбор оптимального варианта СТС системы очистки, необходимо решить вопрос о выборе методов нормализации множества критериев и их ранжирования, а также метода многокритериального выбора [12]. В данной работе критерий оптимальности F_1 представляет собой сумму взвешенных относительных потерь критериев: приведенных затрат на реализацию совокупности стадий очистки; надежности функционирования системы очистки; технологичности процессов очистки.

Интегральный критерий F_1 можно записать как

$$F_1(t) = \sum_{i=1}^3 \rho_i \omega_i^i(t), \quad (2.14)$$

где ρ_1, ρ_2, ρ_3 – весовые коэффициенты,

$$\rho = \{\rho_i\} = \{\rho_i : \rho_i > 0 \quad i = 1, \dots, 3, \sum_{i=1}^3 \rho_i = 1\}; \quad (2.15)$$

$\rho_i \omega_i^i(t)$ – взвешенные потери по i -му критерию; $\omega_i^i(t) = \omega_i^i(F_1^i(t))$, $i = 1, \dots, 3$, $t \in T$ – монотонные функции, преобразующие каждую функцию цели $F_1^i(t)$, $i = 1, \dots, 3$, $t \in T$ к безразмерному виду.

$F_1^1(t)$ – экономический критерий, включающий в себя укрупненные приведенные затраты на реализацию системы очистки; $F_1^2(t)$ – оценка надежности функционирования системы очистки; $F_1^3(t)$ – критерий технологичности проведения совокупности процессов очистки; $F_1^{1,zad}$, $F_1^{2,zad}$, $F_1^{3,zad}$ – допустимые значения показателей функционирования системы очистки. Причем для функции цели $F_1^1(t)$ находится минимум, а для $F_1^2(t)$, $F_1^3(t)$ – максимум.

$$\begin{aligned} \omega_1^1(t) &= \frac{F_1^1(t) - F_1^{1^0}}{F_1^{1_{\max}} - F_1^{1^0}}; & \omega_1^2(t) &= \frac{F_1^{2^0} - F_1^2(t)}{F_1^{2^0} - F_1^{2_{\min}}}; \\ \omega_1^3(t) &= \frac{F_1^{3^0} - F_1^3(t)}{F_1^{3^0} - F_1^{3_{\min}}}, & t &\in T, \end{aligned} \quad (2.16)$$

где $F_1^{1_{\max}}$ – наибольшее значение минимизируемой функции $F_1^1(t)$, $t \in T$ на множестве допустимых альтернатив T ; $F_1^{2_{\min}}$, $F_1^{3_{\min}}$ – наименьшее значение максимизируемых функций $F_1^2(t)$, $F_1^3(t)$, $F_1^{1^0}$, $F_1^{2^0}$, $F_1^{3^0}$ – оптимальные значения функций цели соответственно $F_1^1(t)$, $F_1^2(t)$, $F_1^3(t)$. Значения $\omega_i^i(t)$, $i = 1, \dots, 3$, $t \in T$ лежат в пределах от 0 до 1.

Необходимо найти такую компромиссную альтернативу $t \in T$, которая может не являться оптимальной ни для одной функции цели $F_1^1(t)$, $F_1^2(t)$, $F_1^3(t)$, но оказываться приемлемой для интегрального критерия $F_1(t)$. Компромиссное решение в классическом варианте предполагает равенство минимально возможных взвешенных потерь $\rho_i \omega_i^i(t) = k_{0(\min)}$, $i = 1, \dots, 3$. Так как в данной работе при поиске оптимального решения используется метод полного перебора, то достижение равенства взвешенных потерь $\rho_i \omega_i^i(t)$ является необязательным.

Экономический критерий оптимальности F_1^1 представляет собой сумму приведенных затрат совокупности стадий очистки K_t^1 и затрат на аренду земельного участка A_t^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_1^1 , представляют собой следующие зависимости:

$$K_t^1 = \sum_{i=1}^{N_t'} \alpha'_{q_i} Q_i^{\beta_i}, \quad A_t^1 = \sum_{i=1}^{N_t'} \alpha''_{q_i} Q_i^{\beta_i}. \quad (2.17)$$

Здесь N' – количество стадий процесса очистки сточных вод от примесей солей азота и фосфора; $q_{\text{нач}}$, $q_{\text{факт}}$, $q_{\text{необх}}$ – соответственно начальный, конечный и требуемый уровень качества воды (табл. 2.1); X – множество технологических стадий очистки сточных от примесей солей азота и фосфора; $t_{\text{опт}}$ – комбинация, состоящая из технологических x_i -х стадий, при которой критерий оптимальности достигает минимального значения, $x_i \in X$; N'_t – число стадий для t -й комбинации стадий очистки; Q_i – расход сточных вод x_i -й стадии; α'_{q_i} , β'_{q_i} , α''_{q_i} , β''_{q_i} – коэффициенты, учитывающие зависимость величины затрат стадии i от уровня качества воды и расхода.

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		

Критерий надежности оборудования F_1^2 для реализации совокупности процессов очистки определяется как свойство оборудования выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического применения, технического обслуживания и ремонтов. Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения оборудования и условий его эксплуатации может включать безотказность, ремонтпригодность и сохраняемость в отдельности или определенное сочетание этих свойств как для оборудования в целом, так и для его частей.

$$F_1^2 = \max_T \prod_{i=1}^{N_t} P t_i, \quad (2.18)$$

где Pt_i – вероятность безотказной работы оборудования на i -й стадии очистки. Данные о показателях надежности для отдельных технологических процессов приведены в табл. 2.2.

Критерий технологичности совокупности процессов очистки. Технологичностью процесса называется удобство и легкость его осуществления, позволяющие выполнить процесс, обеспечивающий получение заданных результатов с наименьшими затратами живого и овеществленного труда.

$$F_1^3 = \max_T \prod_{i=1}^{N_i} Te_i, \quad (2.19)$$

где Te_i – технологичность i -го процесса очистки. Данные о показателях технологичности проведения отдельных видов процессов очистки приведены в табл. 2.2

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 операций (стадий), обладающих разной эффективностью очистки, формируется целостная

2.2. Технологические процессы очистки сточных вод

от примесей азота и фосфора

Код стадии	Наименование технологического процесса (стадии)	Предшествующая стадия	Качество воды до стадии	Качество воды после стадии	Надежность (0–1)	Технологичность, балл (0–10)
аа	предварительное усреднение			0	0,83	6,4
аb	нагнетание воды	аа	0	0	0,84	7,3
а1	обычное осаждение	аа	0	1	0,82	9,1
а1	обычное осаждение	аb	0	1	0,82	9,1
а2	осаждение с коагуляцией известью	аа	0	1	0,90	8,3
а2	осаждение с коагуляцией известью	аb	0	1	0,90	8,3
а3	осаждение с коагуляцией сернокислым алюминием	аа	0	1	0,91	8,1
а3	осаждение с коагуляцией сернокислым алюминием	аb	0	1	0,91	8,1
...	...	...	...	...	...	...
b1	капельная биофильт-	а1	1	2	0,75	6,4

	рация					
b1	капельная биофилт-рация	a3	1	3	0,75	6,4
c1	очистка активным илом	a1	1	2	0,82	6,3
c2	очистка активным илом	a3	1	3	0,82	6,3
t1	очистка с помощью вращающихся дисков	a1	1	2	0,81	6,1
g1	нитрификация	b1	2	8	0,66	6,5
g2	нитрификация	a3	1	7	0,66	6,5
h1	денитрификация	g1	8	13	0,63	6,2
...	...	...	...	...	...	...
j1	хлорирование	a2	1	8	0,89	7,8
...	...	...	...	...	...	...

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 принятого критерия оптимальности (оценок по затратам, надежности и технологичности).

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 (c1). Данную операцию возможно использовать только тогда, когда поступающая вода имеет уровень качества равный единице, т.е. когда она

подверглась очистке на предыдущей стадии процессами (a1) – (a3). То есть имеются три возможных цепочки для достижения второго уровня качества с использованием очистки сточных вод активным илом.

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 системы Windows. Результаты решения задачи выбора структуры техноло-

гической 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 аппаратного 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.

$$r_{\text{opt}} = \arg \min_{r \in R} F^2(r), \quad r = (r_m, r_b, r_o),$$

$$F^2 = \sum_{i=1}^{N_m''} F_{mi}^2(r_{mi}, \bar{C}_{m.\phi}, \bar{Q}_m) + \sum_{j=1}^{N_b''} F_{bj}^2(r_{bj}, \bar{C}_{b.\phi}, \bar{Q}_b) + \sum_{k=1}^{N_o''} F_{ok}^2(r_{ok}, \bar{C}_{o.\phi}, \bar{Q}_o) + U^2(\bar{C}_{\text{вых.}\phi}, \bar{C}_{\text{фон}}, \bar{Q}, \Psi), \quad (2.20)$$

$$r_m \in R_m, \quad r_b \in R_b, \quad r_o \in R_o,$$

$$R_m = (T_m'', L_m'', N_m''), \quad R_b = (T_b'', L_b'', N_b''), \\ R_o = (T_o'', L_o'', N_o''),$$

при выполнении условий:

$$\bar{C}_{m.\phi} \leq \bar{C}_m^{\text{доп}}, \quad \bar{C}_{b.\phi} \leq \bar{C}_b^{\text{доп}}, \quad \bar{C}_o \leq \bar{C}_{o.\phi}^{\text{доп}}, \quad (2.21)$$

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; $\bar{C}_m^{доп}$, $\bar{C}_b^{доп}$, $\bar{C}_o^{доп}$, $\bar{C}_{м.ф}$, $\bar{C}_{б.ф}$, $\bar{C}_{о.ф}$ – 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 (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 параметры	Единица измерения	Расчетная зависимость
1	Первичные отстойники: капитальные затраты $\tilde{Z}_{q_1}$ приведенные затраты $\tilde{П}_1$	тыс. р. тыс. р./год	$\tilde{Z}_{q_1} = (0,077V_1 + 7,98D_1 - 22,85) \times \tilde{N}_1 / 4$ $\tilde{П}_1 = 0,131\tilde{Z}_{q_1}$
2	Аэротенки: капитальные затраты $\tilde{Z}_{q_2}$ приведенные затраты $\tilde{П}_2$ ($\tilde{Z}_{q_2}$ – стоимость воздухоудв. станции; $\tilde{Z}_{q_2}''$ – стоимость потребляемой электроэнергии)	тыс. р. тыс. р./год	$\tilde{Z}_{q_2} = 0,131V_2 + 98,4$ $\tilde{П}_2 = 0,131(\tilde{Z}_{q_2} + \tilde{Z}_{q_2}'') + \tilde{Z}_{q_2}''$
3	Вторичные отстойники:		

капитальные затраты $\tilde{Z}_{q_3}$	тыс. р.	$\tilde{Z}_{q_3} = (446,73 + 1,84D_3 + 0,15V_3) \times$ $\times N_3 / 4$
--	---------	---

Продолжение табл. 2.3

№ п/п	Сооружения, оборудование и их параметры	Единица измере- ния	Расчетная зависимость	
4	Сооружения для аэробной стабилиза- ции: капитальные затраты $\tilde{Z}_{q_4}$ приведен- ные затраты $\tilde{\Pi}_4$ ($\tilde{Z}_{q_4}$ – стои- мость возду- ходувной станции; $\tilde{Z}_{q_4}^*$ – стои- мость по- требляемой электро- энергии)	тыс. р. тыс. р./год	$\tilde{Z}_{q_4} = 0,131V_4 + 98,4$ $\tilde{\Pi}_4 = 0,131(\tilde{Z}_{q_4} + \tilde{Z}_{q_4}^*) + \tilde{Z}_{q_4}^*$	
5	Воздуходув- ные стан- ции: капитальные затраты $\tilde{Z}_{q_5}$	тыс. р.	Производитель- ность, тыс. м ³ /ч	$\tilde{Z}_{q_5}$
			5	104
			10	108
			40	203
			60	327
			90	377
			270	924

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

2.3.2. Алгоритм решения задачи расчета аппаратурного 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 (2.20) – (2.21) 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 ЛПР предусмотрена возможность оставить для дальнейшего рассмотрения и варианты решения, для которых значения критерия F^2 удовлетворяют условию:

$$F^{2,o} \tilde{k}_2 \leq F^{2,\text{opt}}, \quad \tilde{k}_2 < 1, \quad o = \overline{1, \tilde{O}_2}, \quad (2.22)$$

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 актуаль-

ным 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

$$w^* = \arg \min \{F(w) \mid w \in W = M(\Omega)\}. \quad (2.23)$$

В качестве целевой функции F примем следующие затраты:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4, \quad (2.24)$$

где F_1, F_2 – соответственно стоимость территории, занятой под объекты и коммуникации; F_3 – стои-

мость коммуникаций; F_4 – удорожание (удешевление) стоимости объектов от деления их на части (блокировки с другими объектами).

Составляющие критерия определяются по приведенным ниже вычислениям.

$$F_1 = \sum_{i=1}^N x p_i y p_i s u'_i(x o_i, y o_i), \quad (2.25)$$

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

$$F_2 = \sum_{j=1}^{N_{k1}} \sum_{m=1}^{M'_j} l z'_{jm}(x o_i, y o_i) \cdot l k'_j \cdot s u''_{jm}(x o_i, y o_i) + \\ + \sum_{t=1}^{N_{k2}} \sum_{l=1}^{M''_t} l z''_{tl}(x o_i, y o_i) \cdot l k_t \cdot s u'''_{tl}(x o_i, y o_i), \quad (2.26)$$

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

$$F_3 = \sum_{j=1}^{N_k} (s k_j l z_j + s l_j n l_j), \quad (2.27)$$

где N_k – число всех коммуникаций; $l z_j, s k_j$ – соответственно длина и стоимость единицы длины j -й коммуникации; $s l_j$ – затраты на эксплуатацию и техническую реализацию одного поворота для j -й коммуникации; $n l_j$ – число поворотов j -й коммуникации.

$$F_4 = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i s o_i, \quad (2.28)$$

где $s o_i$ – 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: $\forall i, c \in [1, \dots, N]$

$$\left(|x_{oi} - x_{oc}| - \frac{xp_i + xp_c}{2} \geq l'_{ic} \right) \vee \left(|y_{oi} - y_{oc}| - \frac{yp_i + yp_c}{2} \geq l'_{ic} \right); \quad (2.29)$$

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

$$\left(|x_{oi} - x_{cj}| - \frac{xp_i + lk_j}{2} \geq l''_{ij} \right) \vee \left(|y_{oi} - y_{cj}| - \frac{yp_i + lk_j}{2} \geq l''_{ij} \right), \quad (2.30)$$

где x_{cj}, y_{cj}, hc_j – координаты точки c_j , принадлежащей групповой или одиночной трассе;

в) между коммуникациями:

$$\left(|x_{cj} - x_{ch}| - \frac{lk_j + lk_h}{2} \geq l'_{jh} \right) \vee \left(|y_{cj} - y_{ch}| - \frac{lk_j + lk_h}{2} \geq l'_{jh} \right) \vee \left(|hc_j - hc_h| - \frac{h'k_j + hk_h}{2} \geq l'_{jh} \right). \quad (2.31)$$

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

$$\alpha_{0i} \leq 180^\circ, \quad i = \overline{1, N_\alpha}, \quad (2.32)$$

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

Условие 3. Прокладка коммуникаций осуществляется на заданных уровнях:

$$H_j = (\pm h_{jt}^0)_{E_j}, \quad j = \overline{1, N_k}, \quad (2.33)$$

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:

$$\forall i, c \in \overline{1, D}, \quad k \in \overline{1, N_{md}};$$

$$\left(|x_{oi} - x_{oc}| - \frac{xp_i + xp_c}{2} \leq l_{3k}'' \right) \vee \left(|y_{oi} - y_{oc}| - \frac{yp_i + yp_c}{2} \leq l_{3k}'' \right). \quad (2.34)$$

Условия (2.29) – (2.34), 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, базирующийся 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

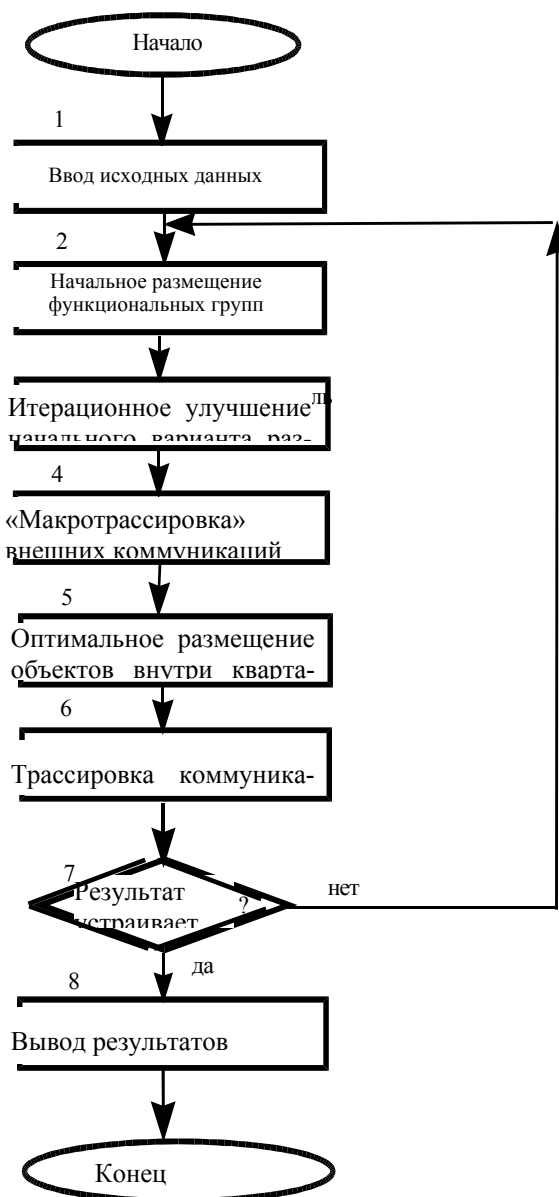


Рис. 2.1. Укрупненная блок-схема алгоритма решения задачи генплана станции БХО сточных вод

или объектами других функциональных групп с учетом правил размещения объектов (2.29) – (2.34), 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.

2. 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 азротенков 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. п. 5).

3. 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.

4. 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.

5. 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 трассиров-

ки 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 (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.

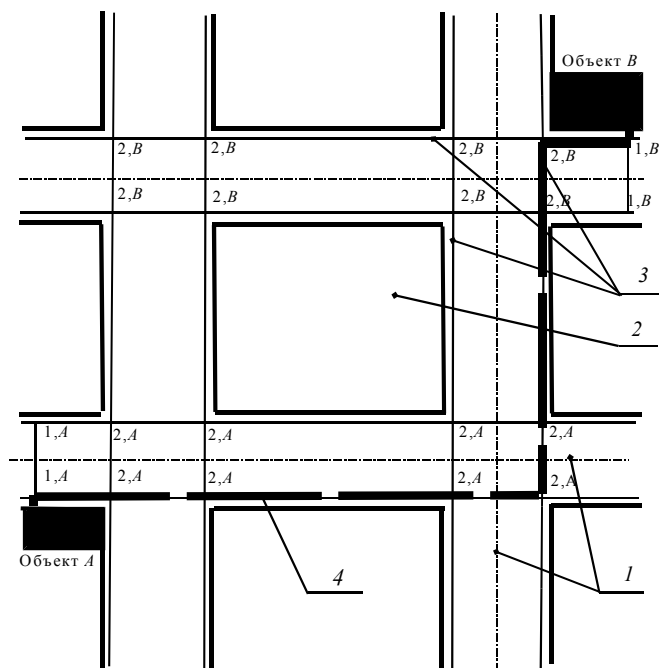


Рис. 2.2. Иллюстрация алгоритма трассировки:

- 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.

3. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ КЛАССА ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ

Для проведения прогнозов изменения количественных показателей состояния компонент окружающей среды (качества воды, воздуха и т.д.) необходимо построение аналитических моделей процессов, протекающих в отдельных типах основного и вспомогательного технологического оборудования промышленных объектов и компонентах окружающей среды, которые бы учитывали гидродинамические особенности потоков в них, кинетические закономерности процессов и вероятностный характер их протекания. Выполнение прогнозов качества воды можно осуществить с помощью математических моделей технологических процессов, протекающих в очистных сооружениях и водоеме – приемнике сточных вод. В течение ряда лет нами был накоплен опыт использования математических моделей процессов: биоокисления органических соединений в аэротенке; денитрификации в аппарате с перемешивающим устройством; самоочищения и распространения примесей в реке и др. При разработке 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 (БХП) в самом общем случае представлена в виде схемы, изображенной на рис. 3.1. Из нее следует, что для одной и

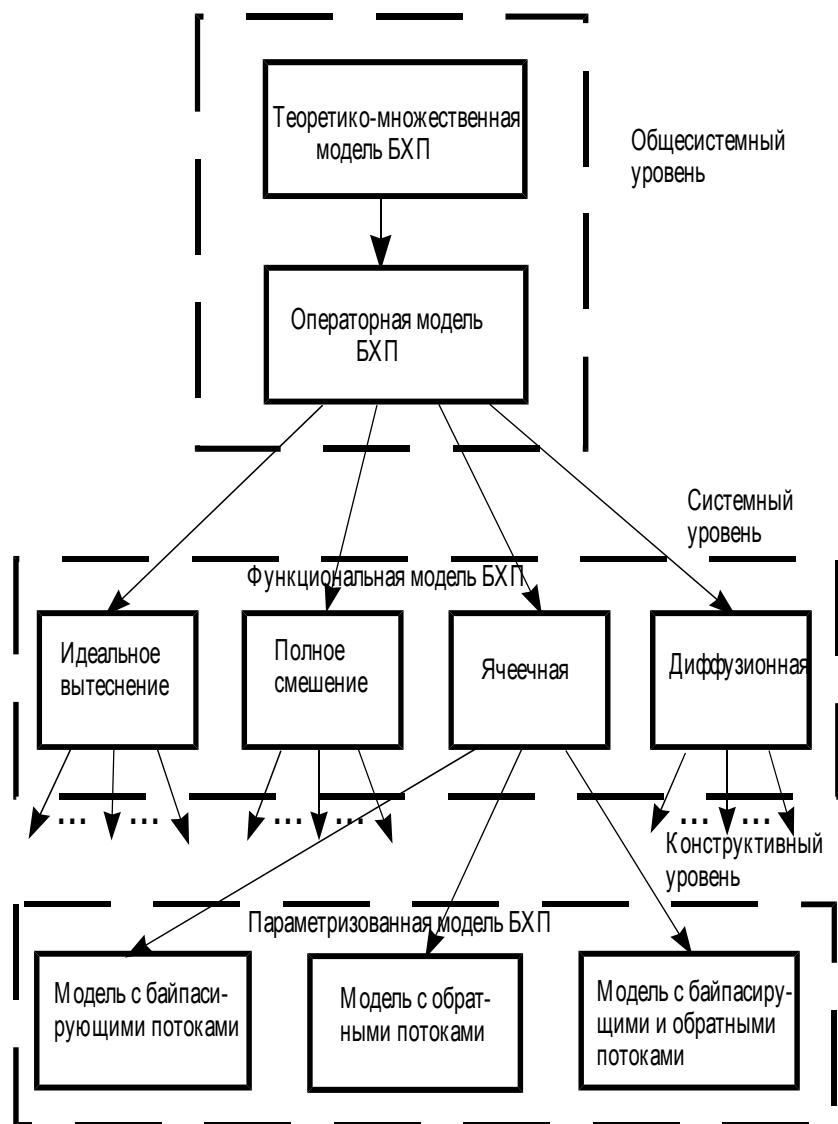


Рис. 3.1. Уровни детализации модели биохимических процессов

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

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

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

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

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

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:

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

где K_m – число реализаций конструктивных моделей.

Каждая модель $\overline{M}_i$ обеспечивает определенное качество имитации БХП, которое будем характеризовать целевой функцией $\tilde{\varphi}(\overline{M}_i)$. 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 $\overline{M}_i^*$, для которой выполняется условие

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

где opt – процедура взятия максимума или минимума функции.

Вследствие ограниченности временных $\tilde{T}$ и материальных $\tilde{S}$ ресурсов, выделенных на поиск, нахождение $\tilde{M}_i^*$ 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 случае 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 $\tilde{T}^{\text{lim}}$, $\tilde{S}^{\text{lim}}$ – 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 $\overline{M}_i \in \overline{\overline{M}}, i=1, K_m$; соответственно имитационное испытание БХП на модели $\overline{M}_i$; проверка принадлежности модели $\overline{M}_i$ 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» 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 $\overline{M}_i \in \overline{\overline{M}}, i=1, K_m$ 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].

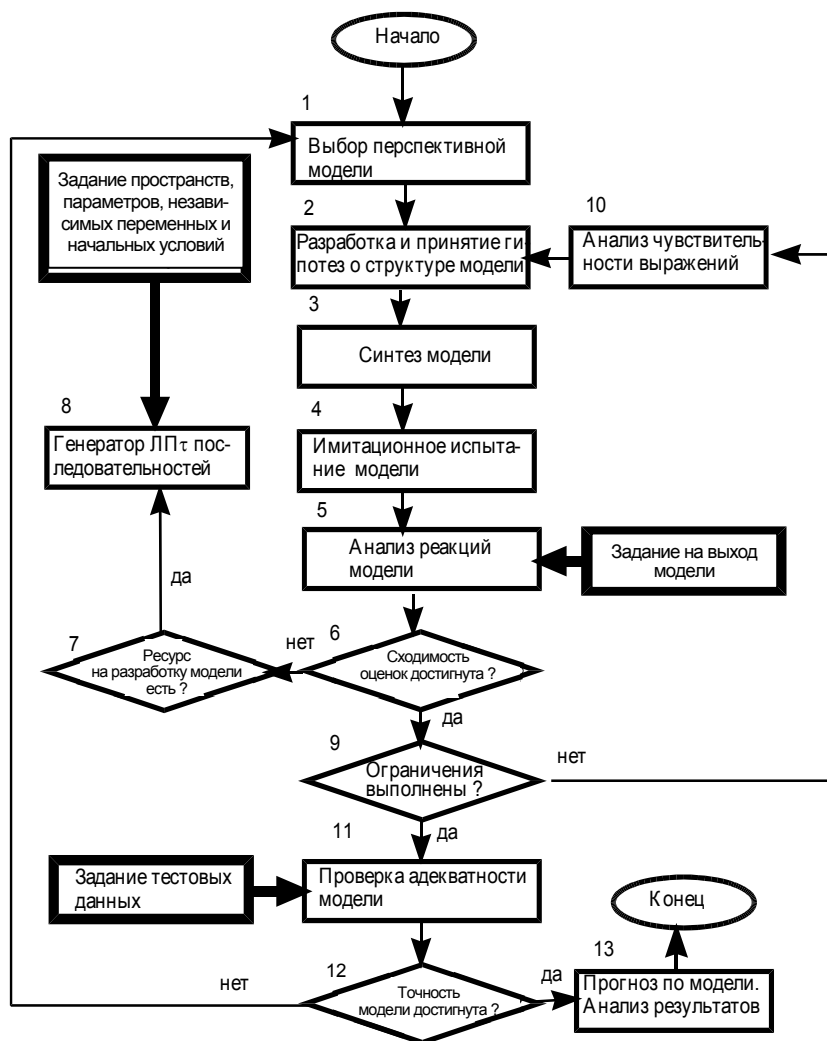


Рис. 3.2. Формализация основных этапов автоматизированного моделирования биохимических процессов

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 $H = \{Y \mid (3.7)\}$, 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

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

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

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

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

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

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

В случае экспоненциальной функции

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

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

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

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

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.

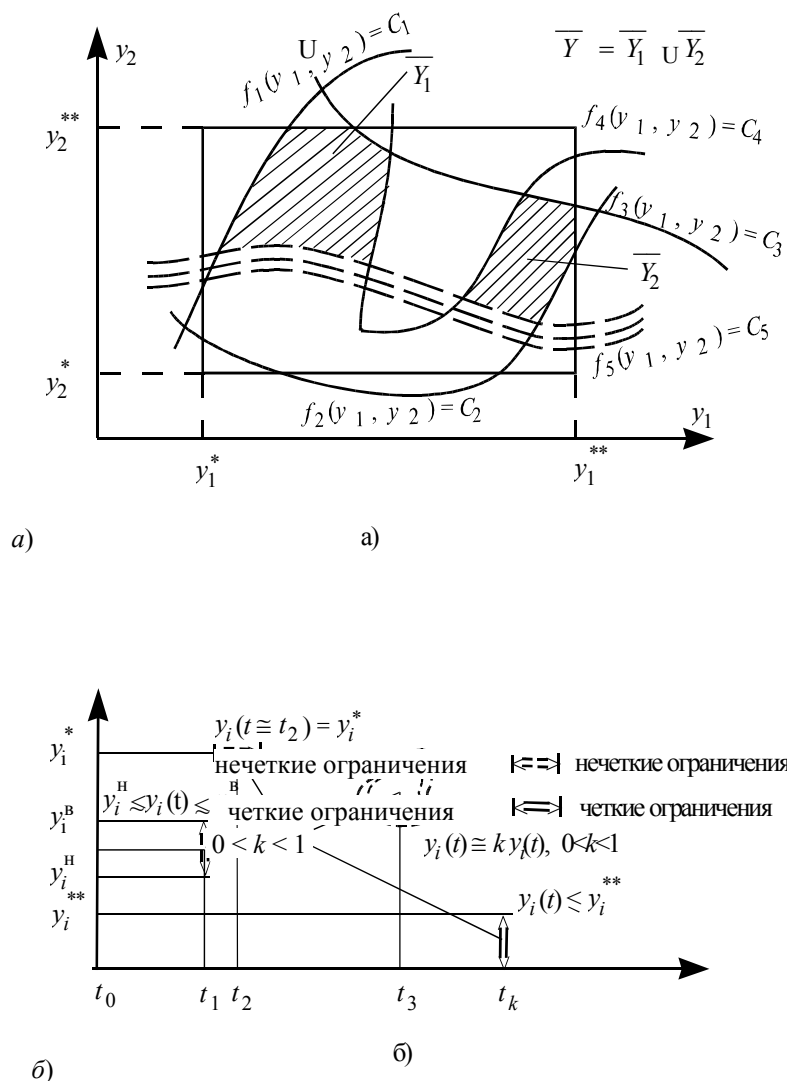


Рис. 3.3. Возможные варианты определения областей «допустимых» реакций в случае статической (а) и динамической (б) модели

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} отобра-

жается 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 . 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

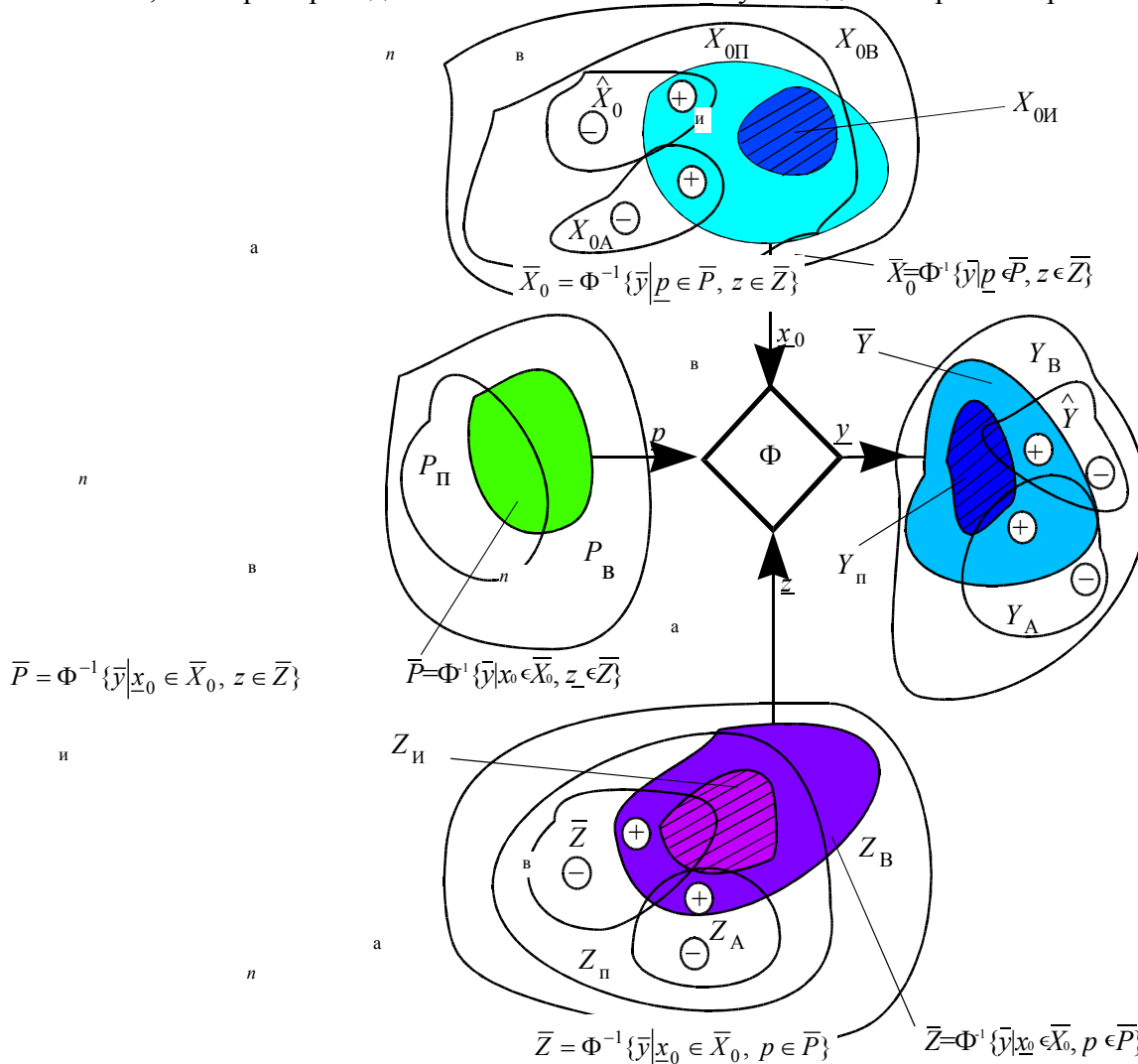


Рис. 3.4. Схема испытаний математической модели:

$X_{0\text{в}}, P_{\text{в}}, Z_{\text{в}}$ – пространства возможных начальных состояний, параметров и входных переменных; $X_{0\text{и}}, P_{\text{и}}, Z_{\text{и}}$ – пространства выборочных значений векторов x, z, y , используемые при идентификации модели; $X_{0\text{а}}, Z_{\text{а}}$ – пространства, используемые при проверке адекватности модели; $\hat{X}_0, \hat{Z}$ – пространства выборочных значений, используемые для прогноза

распределенных последовательностей. В литературе он известен как ЛПт [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; $R_{i,l}^\alpha$ – 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; $R_{i,l}^\beta$ – 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

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

где ψ – весовой коэффициент.

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

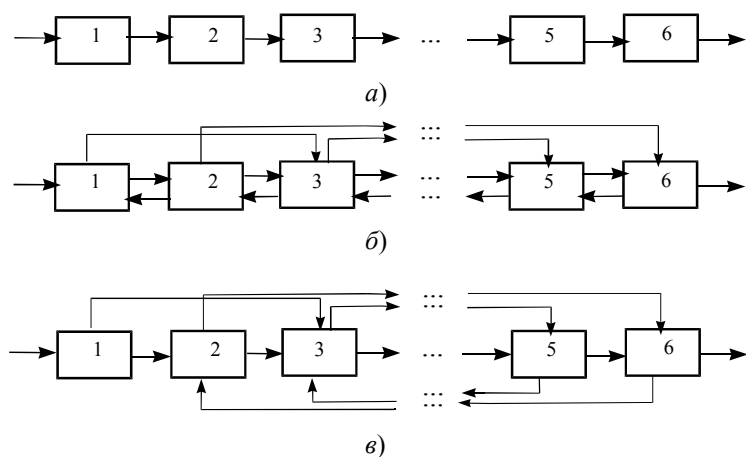


Рис. 3.5. Примеры гидродинамических структур

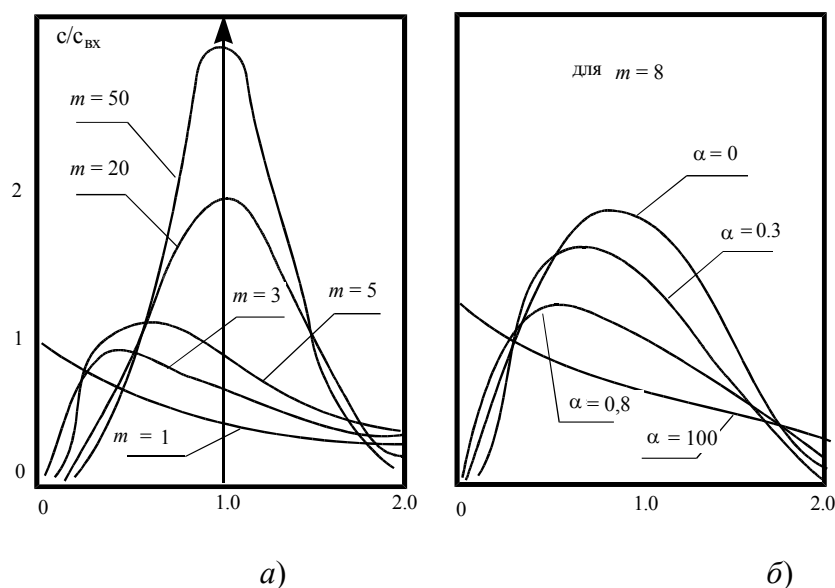


Рис. 3.6. Теоретические кривые вымывания для ячейечной модели без обратных и байпасирующих потоков (а) и ячейечной модели с обратными рециркулирующими потоками (б):

m – число ячеек; α – коэффициент межъячеечной рециркуляции 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]:

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

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 значитель-

ное уменьшение содержание 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:

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

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

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

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

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

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

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

...

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

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

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

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

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, °C; Y_2^H – концентрация растворенного кислорода при насыщении, мг/л; $k_{1,20}, k_{8,20}$ – соответственно значения k_1 и k_8 при $T_1 = 20$ °C; $\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \tilde{\alpha}_3, \dots, \tilde{\alpha}_K$; $\tilde{\beta}_1, \tilde{\beta}_2, \tilde{\beta}_3, \dots, \tilde{\beta}_K$ – 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.

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

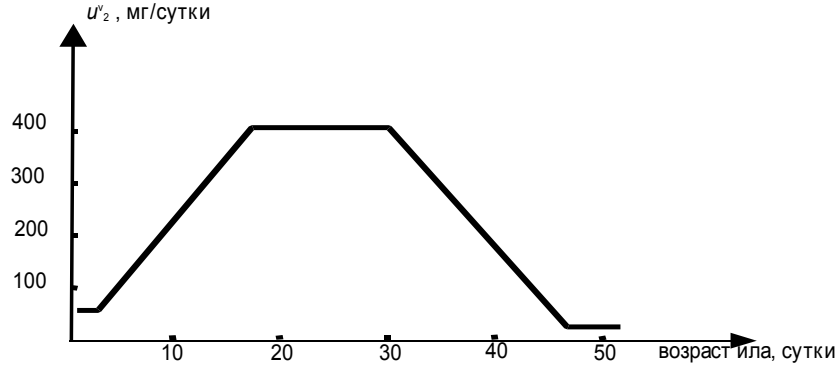


Рис. 3.7. Зависимость скорости осаждения ила
в радиальном вторичном отстойнике

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

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

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

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 pH-среды конечными продуктами могут быть либо NO, либо N₂O, либо N₂. Так, по данным работы [50] при pH < 7,3 наиболее вероятно образование N₂O. Значение pH = 7,5 ... 8,0 обеспечивает течение процесса денитрификации до N₂ [4]. Помимо pH 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 анаэробных 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 анаэробных 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].

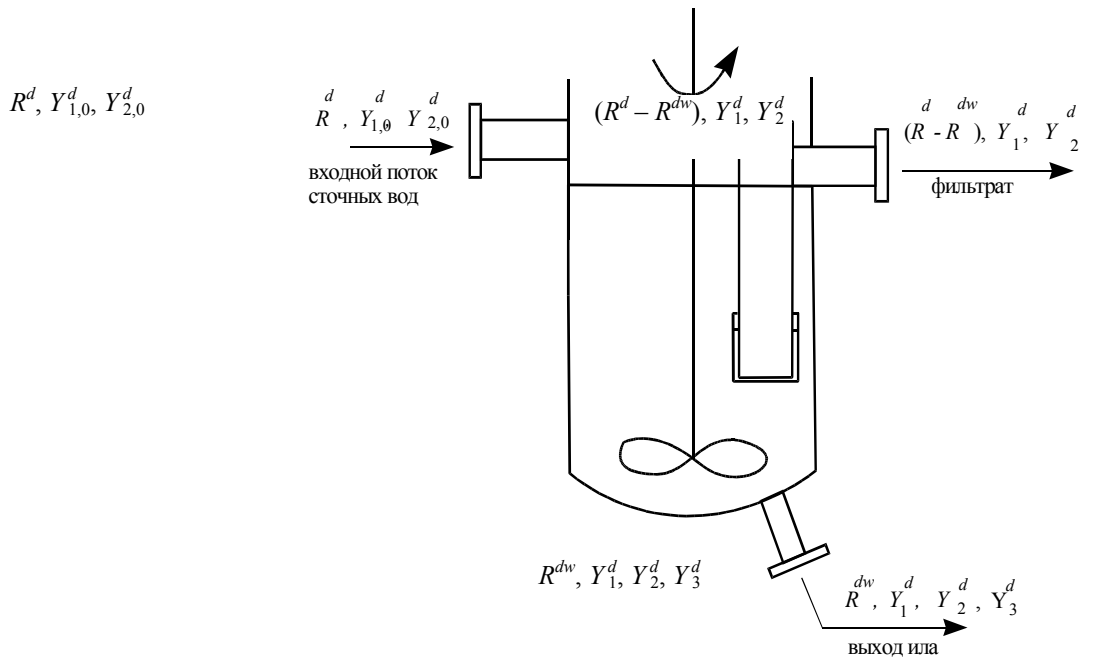


Рис. 3.8. Схема непрерывного процесса денитрификации

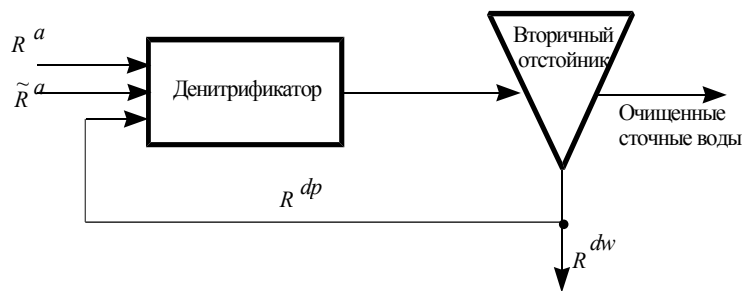


Рис. 3.9. Структурная схема подсистемы «денитрификатор – вторичный отстойник»

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:

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

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

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

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 осаж-
дения ила во вторичном отстойнике, образует математическое описание подсистемы «денитри-
фикатор – вторичный отстойник».**

3.2.4. Математическая модель реки с малым расходом воды

В отечественной и зарубежной литературе описано большое число математических моделей рас-
пространения примесей в водных потоках, учитывающих процессы аэробного окисления органических
соединений, роста и отмирания планктона и т.п. [35, 53]. Все эти модели предназначены для исследова-
ния конкретных объектов. Применение их для других аналогичных объектов связано с серьезными
трудностями, поскольку использование традиционных методов идентификации предполагает проведе-
ние большого числа экспериментов. К тому же большинство известных моделей относится к классу де-
терминированных, тогда как природные водоемы – термодинамически открытые системы, подвержен-
ные 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 несовершен-
ства 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 различ-
ных стадиях удаления загрязнений из сточных вод ПХП являются природные водоемы – приемники
сточных вод. Чаще всего это реки разного народнохозяйственного назначения [25].

При выборе структуры математической модели, используемой в качестве «кандидата» для проведе-
ния имитационных испытаний с помощью подсистемы автоматизированного моделирования для каж-
дого предполагаемого водоема – приемника очищенных сточных вод ПТС, необходимо проведение
анализа экспериментальных данных о состоянии его водной среды, полученных региональными, город-
скими, 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, реаэрации 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 идеального 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]:

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

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

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

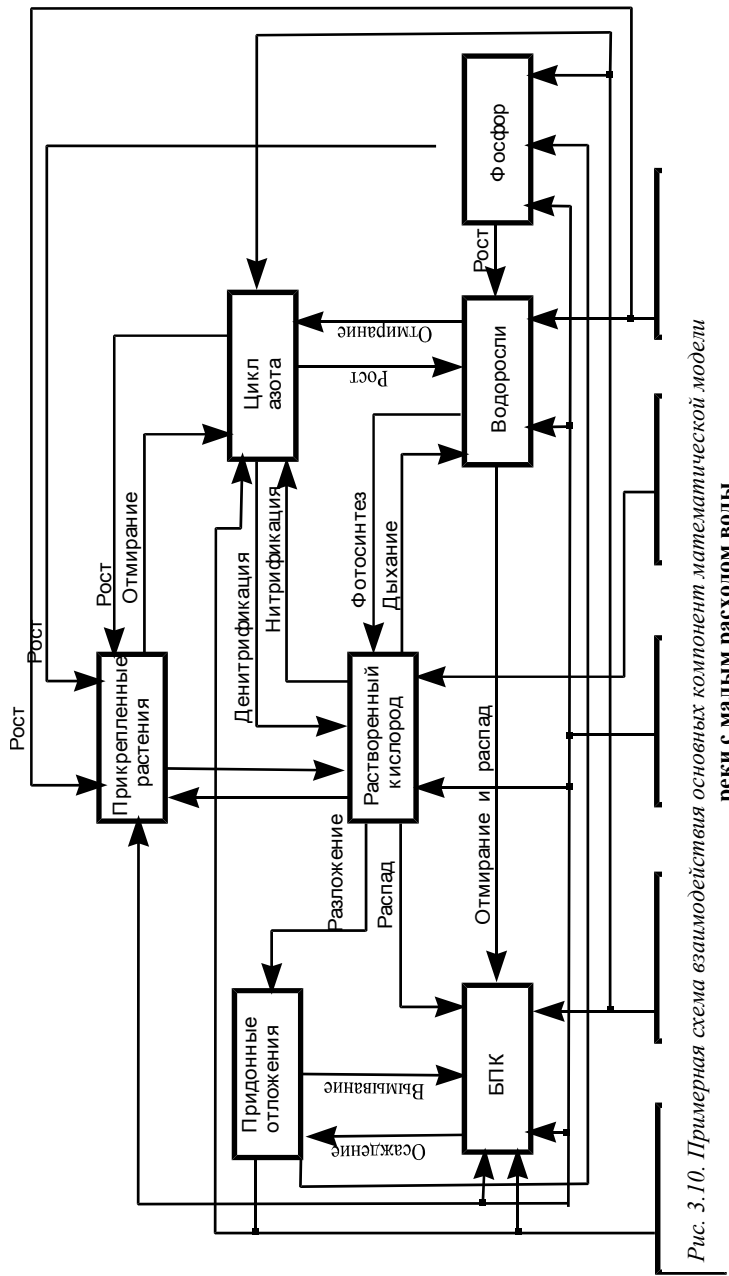


Рис. 3.10. Примерная схема взаимодействия основных компонент математической модели реки с малым расходом воды

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$Y_{1,i}^r(t=0) = Y_{1,i0}^r, Y_{2,i}^r(t=0) = Y_{2,i0}^r, Y_{3,i}^r(t=0) = Y_{3,i0}^r, Y_{4,i}^r(t=0) = Y_{4,i0}^r, \quad (3.61)$$

$$Y_{5,i}^r(t=0) = Y_{5,i0}^r, Y_{6,i}^r(t=0) = Y_{6,i0}^r, Y_{7,i}^r(t=0) = Y_{7,i0}^r, \quad i = 1, m^r.$$

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, °C; 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 °C.

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 4.3.

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_{lv} 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), ос-

новные 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 ячейочной 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.

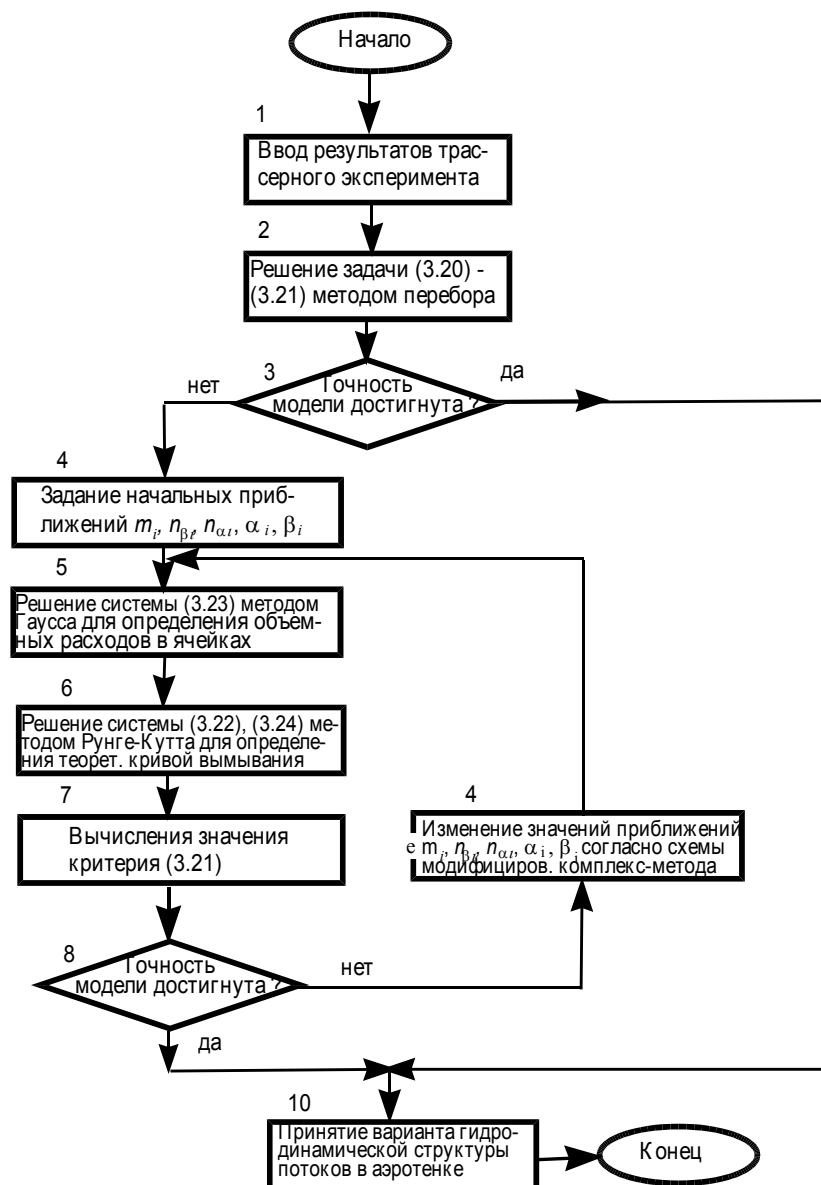


Рис. 3.11. Укрупненная блок-схема алгоритма определения

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 $Y_{1,\text{вых}}^v$ устанавливается с помощью зависимости:

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

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; $Y_{1,\text{вых}}^v$ – 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.

4. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИРОДНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ СИСТЕМЫ

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 м³/сут до 43 000 м³/сут, возникла необходимость реконструкции станции БХО. Характеристики вод, поступающих на очистные сооружения, приведены в табл. 4.1.

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).

4.1. Входные характеристики сточных вод для очистных сооружений г. Моршанска

НАИМЕНОВАНИЕ	ЕДИНИЦ А ИЗМЕРЕН ИЯ	КОЛИЧЕС ТВО
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

4.2. Список основных объектов новой очереди очистной станции г. Моршанска

п/ п	Наименование	Но- мер типового проекта	оли- чест- во
---------	--------------	--------------------------------	---------------------

	Приемная камера	ТП 902-2-407С.86	
	Песколовка	ТП 902-2-331	
	Первичный ради- альный отстойник	ТП 902-2-483.91	
	Аэротенк	ТП 902-2-396.86	
	Вторичный ради- альный отстойник	ТП 902-2-447.88	
	Установка доочи- стки сточных вод	ТП 902-4-10.84	
	Насосно- воздуходувная станция для подачи воздуха в аэротенк	ТП 902-9-20	
	Регулирующий ре- зервуар		
	Песковая площадка		
0	Корпус обезвожи- вания осадка		
1	Котельная		
2	Административно- бытовое здание		
3	Станция пригото- вления растворов и П/С 35 кв.		
	...	...	

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.

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.

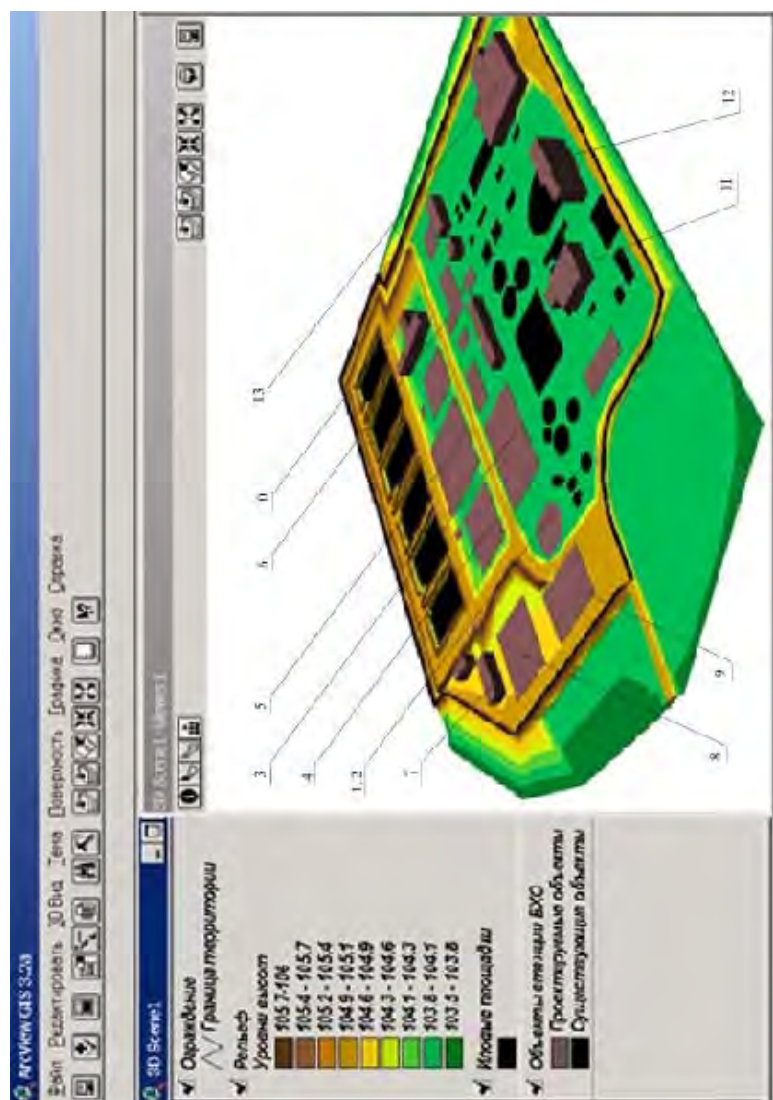


Рис. 4.1 3-D изображение ситуационного плана реконструкции и расширения очистных сооружений г. Моршанска

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

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 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 $n_{\beta_{2-3}}$, $n_{\alpha_{2-3}}$, α_{2-3} , β_{2-3} , изображенные на рис. 4.4, а. Средняя квадратическая относительная ошибка составила 13,2 %. Таким образом,

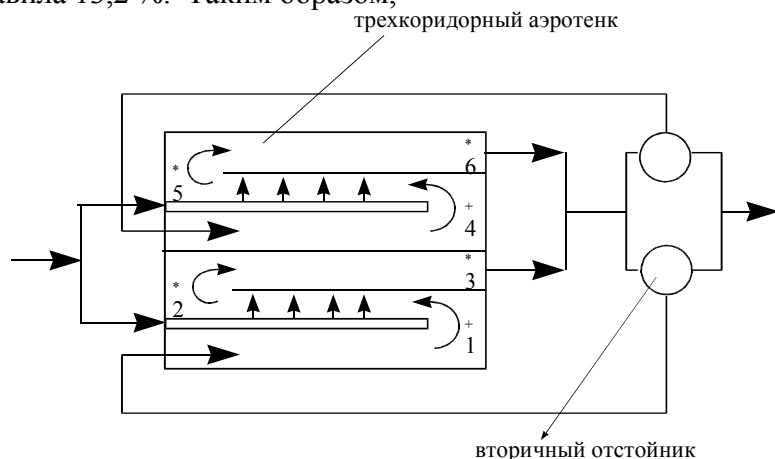


Рис. 4.2. Схема действующей станции

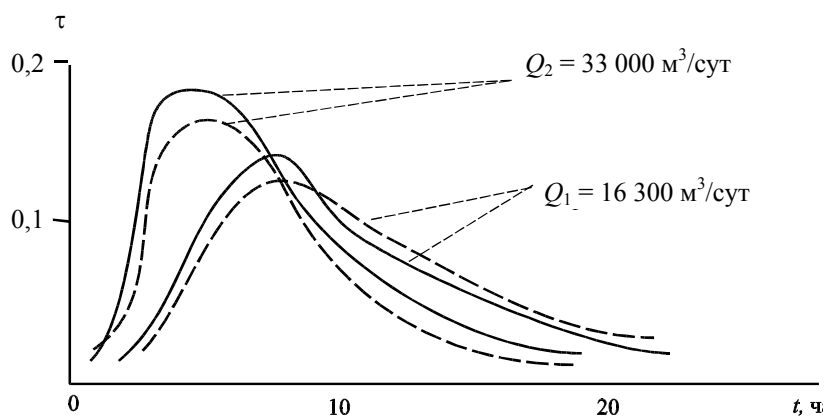


Рис. 4.3. Графики функций ПРВП для действующей (1) и новой (2) станции БХО: сплошные линии – эксперимент, пунктирные – расчет

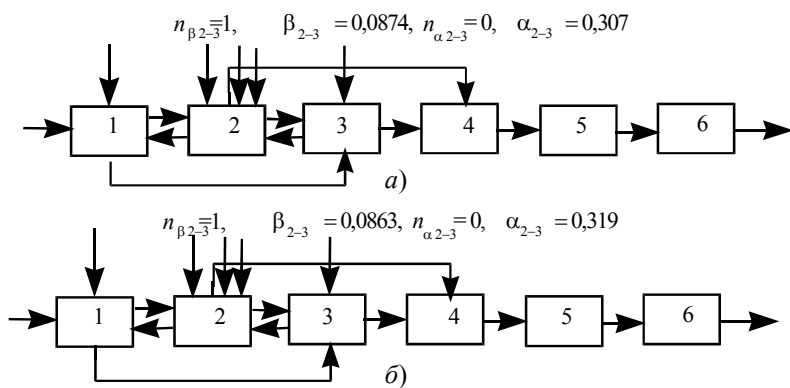


Рис. 4.4. Схема потоков в аэротенке действующей (а) и новой (б) станции БХО

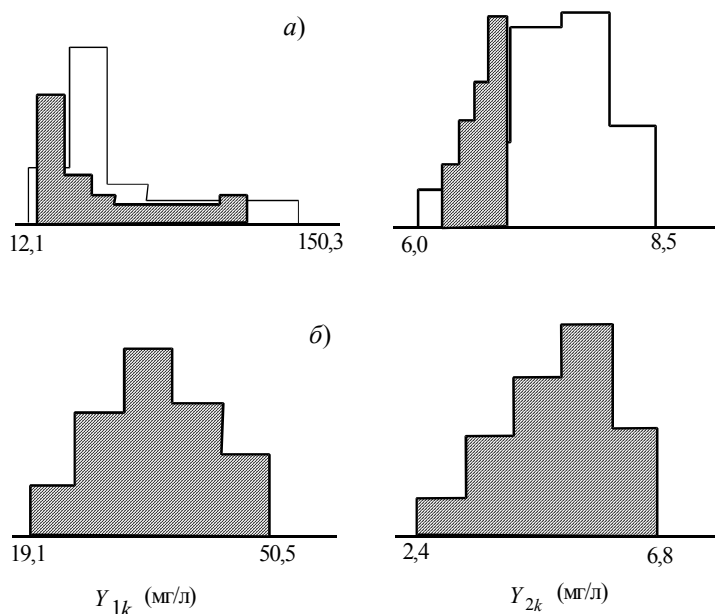


Рис. 4.5. Гистограммы значений выходных переменных, полученных при идентификации модели (а) и прогнозировании для новой станции БХО (б). Незаштрихованные области – все множество реакций, заштрихованные – допустимые реакции

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 $\Pi \rightarrow \text{I}$), 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 азротенка $Y_{i,m}^D \in [Y_{i,m}^*, Y_{i,m}^{**}]$, $i = \overline{1, 2}$, будем формировать допустимые диапазоны изменения параметров $k_s \in [\bar{k}_s^*, \bar{k}_s^{**}]$, $s = \overline{1, 7}$.

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 $Y_{1,m}$, $Y_{2,m}$.

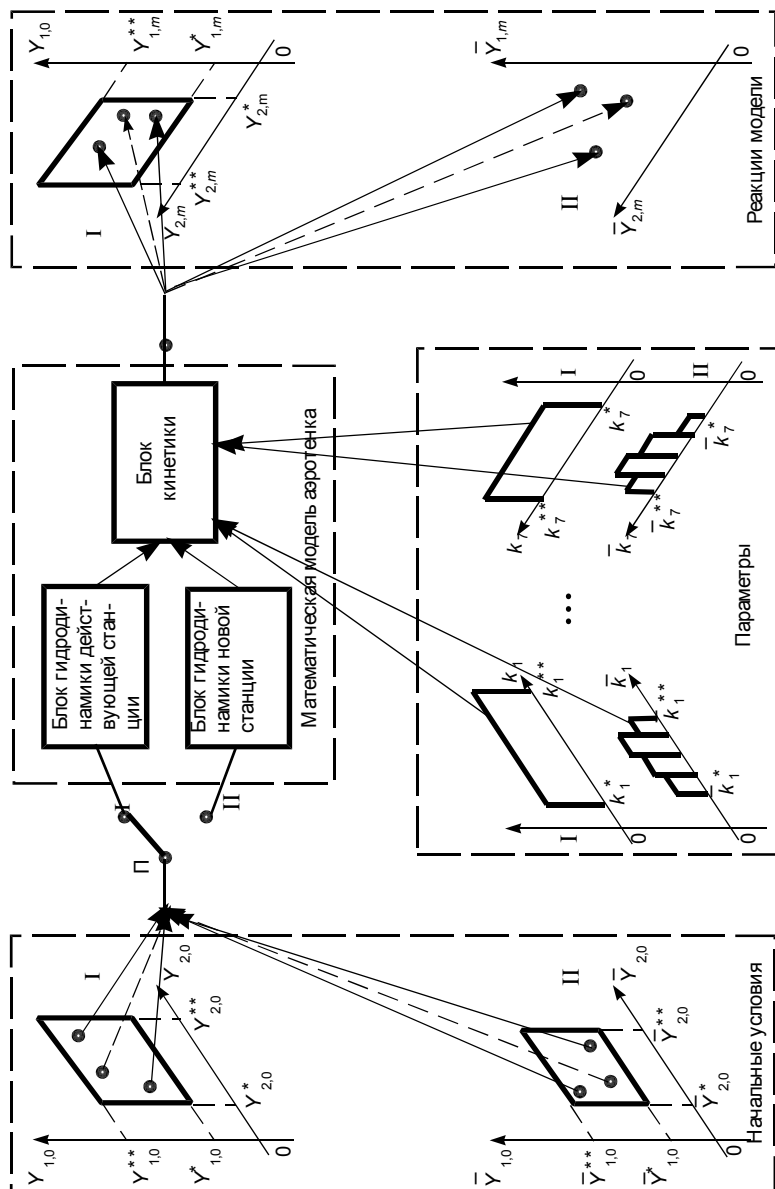


Рис. 4.6. Схема идентификации математической модели (I) и прогноза (II)

4.3. Диапазоны изменения констант модели кинетики

для азротенка станции БХО

№ п/п	Ко- эф- фи- ци- ент	Единица измере- ния	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 загрязненностью 250 мг/л, а для производственного стока она составляет 229 мг/л.

На основании этих данных средняя загрязненность смешанного стока равна:

$$\bar{Y}_{1,0} = (42\,000 \cdot 250 + 24\,000 \cdot 229) / 66\,000 = 242 \text{ мг/л ХПК}.$$

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 $Y_{1,0} \in [242 \pm 20 \text{ \%}]$ 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. 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. 4.7). Река Цна по классификации Огиевского относится к 3-й категории и имеет хозяйственно-питьевое назначение.

Для исследуемого участка характерно следующее: среднегодовой расход – $12,3 \text{ м}^3/\text{с}$, русло умеренно извилистое шириной 45 ... 60 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. 4.7.

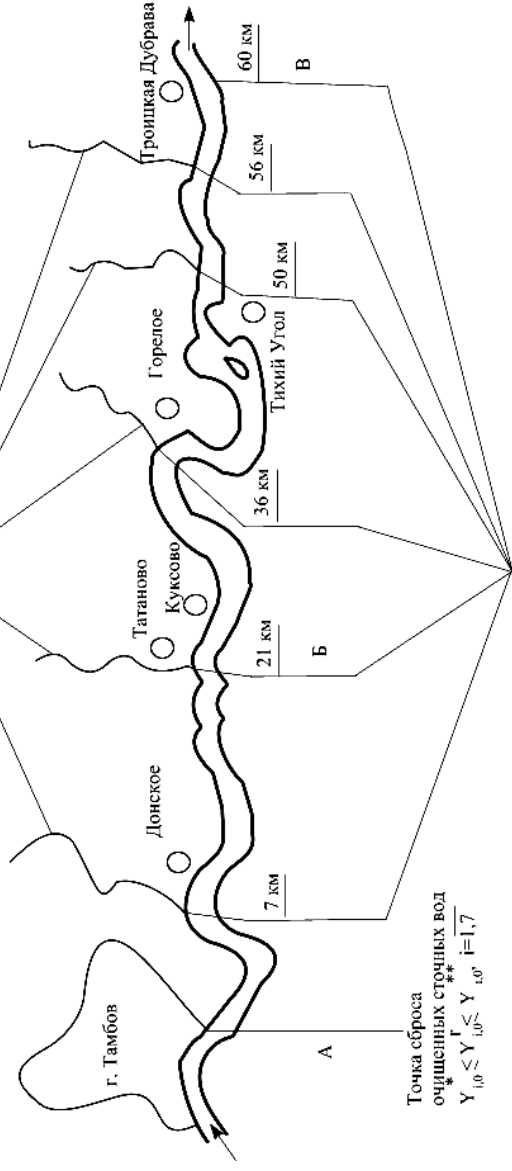
В результате исследования процессов, протекающих в реке, были выделены процессы аэробного окисления органики, нитрификации, денитрификации, роста и отмирания планктона, деаэрации воды кислородом воздуха, аммонификации белка и мочевины, ионного обмена и другие. В качестве «кандидата» модели для проведения 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 формул (3.11) – (3.15). Часть ограничений (3.7) – (3.10) проиллюстрирована на рис. 4.7 и 4.8.

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. 4.9, а начальные диапазоны изменения коэффициентов отмечены под числовой осью. Характер изменения выходных переменных при определенных значениях коэффициентов и начальных условий приведен на рис. 4.8. При отыскании «правдоподобных» диапазонов коэффициентов было выполнено несколько пробных серий решений системы уравнений. На рис. 4.9, а для коэффициента штриховкой под числовой осью отмечен «правдоподобный» диапазон. «Допустимые» реакции с значениями в пределах него образуют пустое множество. Для окончательного выяснения диапазонов изменения коэффициентов было проведено 9300 решений системы уравнений, в 10 % из них получены решения, удовлетворяющие ограничениям. На рис. 4.9, а приведены диапазоны изменения отдельных коэффициентов модели, 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. 4.10 изображены области изменения концентраций растворенного кислорода для всех реакций модели и реакций, удовлетворяющих ограничениям, а также гистограммы. На рис. 4.9, 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

Смывы органики с полей
 $0 \leq Y_{i,3}^* \leq Y_{i,3}^{**}, i=1,7, I=1, \underline{S}$



Точка сброса
 очищенных сточных вод
 $Y_{i,0}^* \leq Y_{i,0}^{**}, i=1,7$

Посты контроля
 качества воды
 $Y_{i,1}^* \leq Y_{i,1}^{**}, i=1,7, I=1, \underline{L}$

Рис. 4.7. Схема участка реки Цны

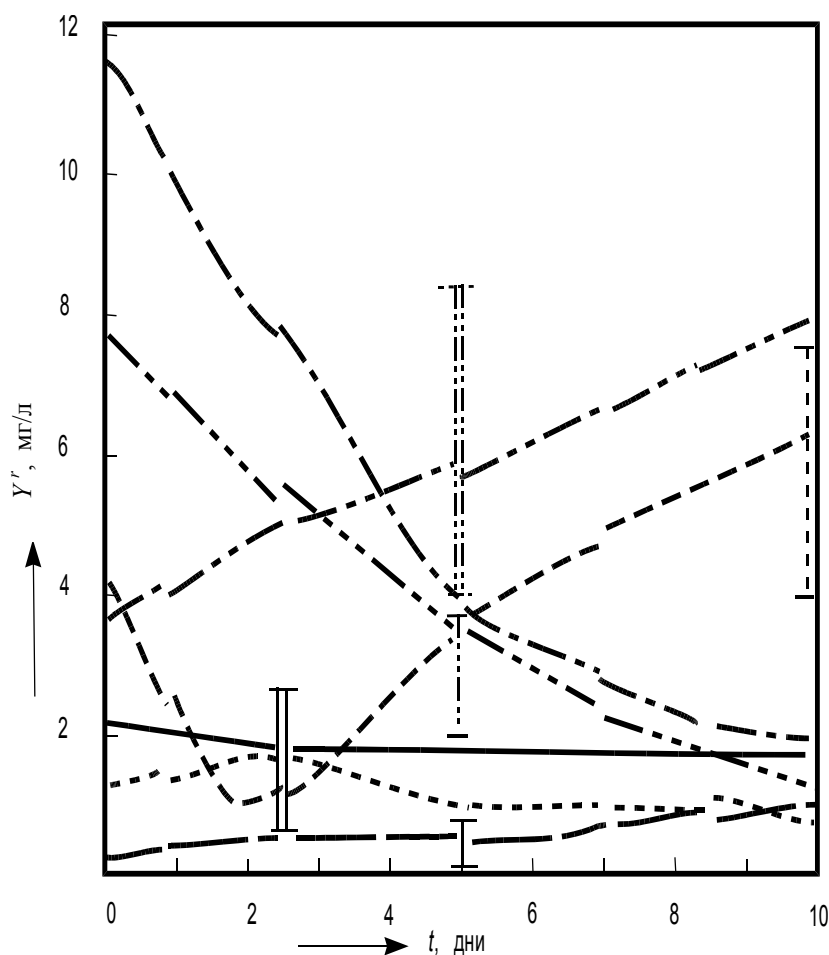


Рис. 4.8. Характер изменения выходных переменных модели:

----- БПК; — · — азот органических соединений; · · · · · аммонийный азот;
 — — — — — нитратный азот; — — — — — растворенный кислород; — — — хром;
 — — — — — фосфор; ——— четкие ограничения; ——— нечеткие ограничения

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

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

то

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

где $Y_{1,i0}^{r,\text{зад}}, Y_{2,i0}^{r,\text{зад}}, \dots, Y_{7,i0}^{r,\text{зад}}, T^{\text{зад}}$ – концентрации примесей, растворенного кислорода и температура в i -м створе реки, известные в момент прогноза $t=0$; $k_j^{\text{H}}, k_j^{\text{B}}$ – 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 .

Гистограммы прогнозируемых концентраций растворенного в воде кислорода приведены на рис. 4.11. Качество воды в контрольном створе реки Цны с вероятностью не менее 0,89 отвечает принятым нормам.

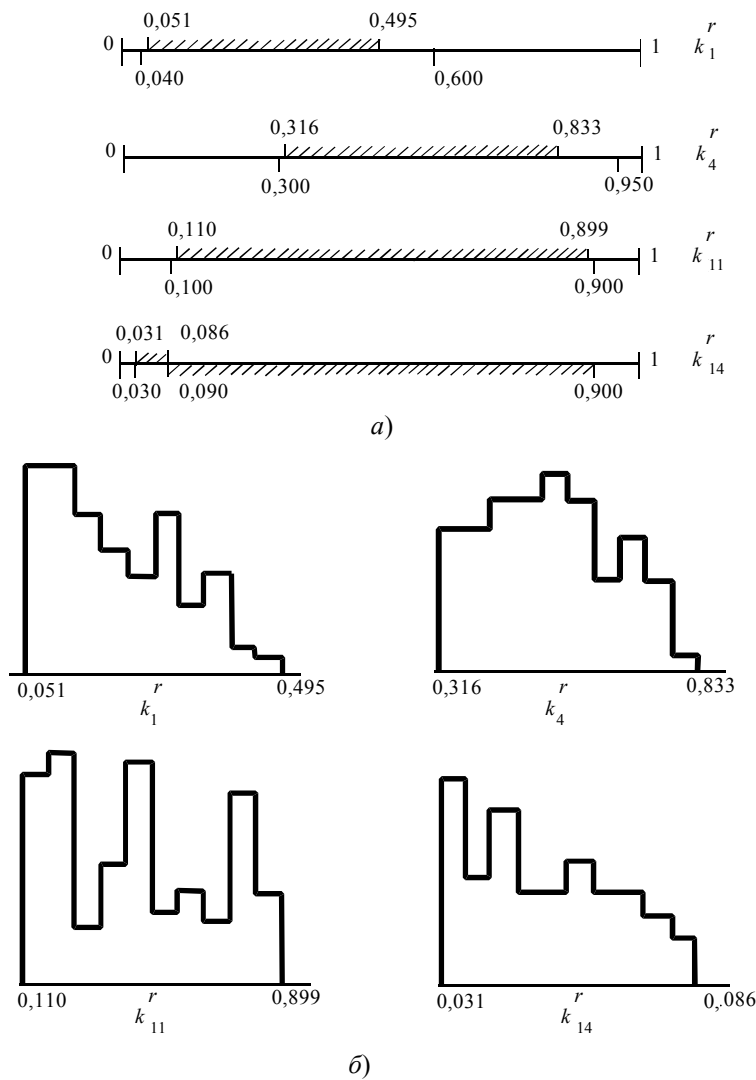


Рис. 4.9. Исходные данные и найденные в ходе испытания модели диапазоны изменения (а) и гистограммы (б) значений коэффициентов $k_1^r, k_4^r, k_{11}^r, k_{14}^r$

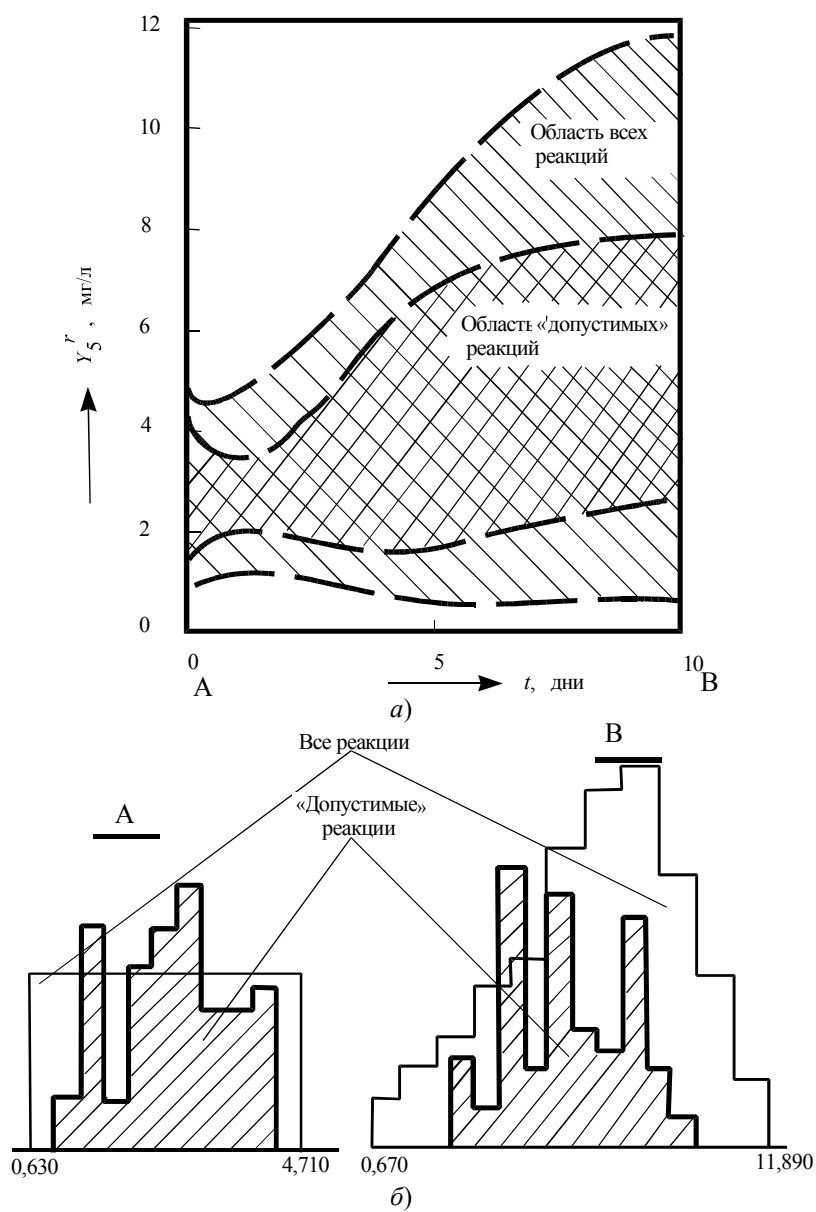


Рис. 4.10. Области изменения (а) и гистограммы значений (б) концентраций растворенного кислорода

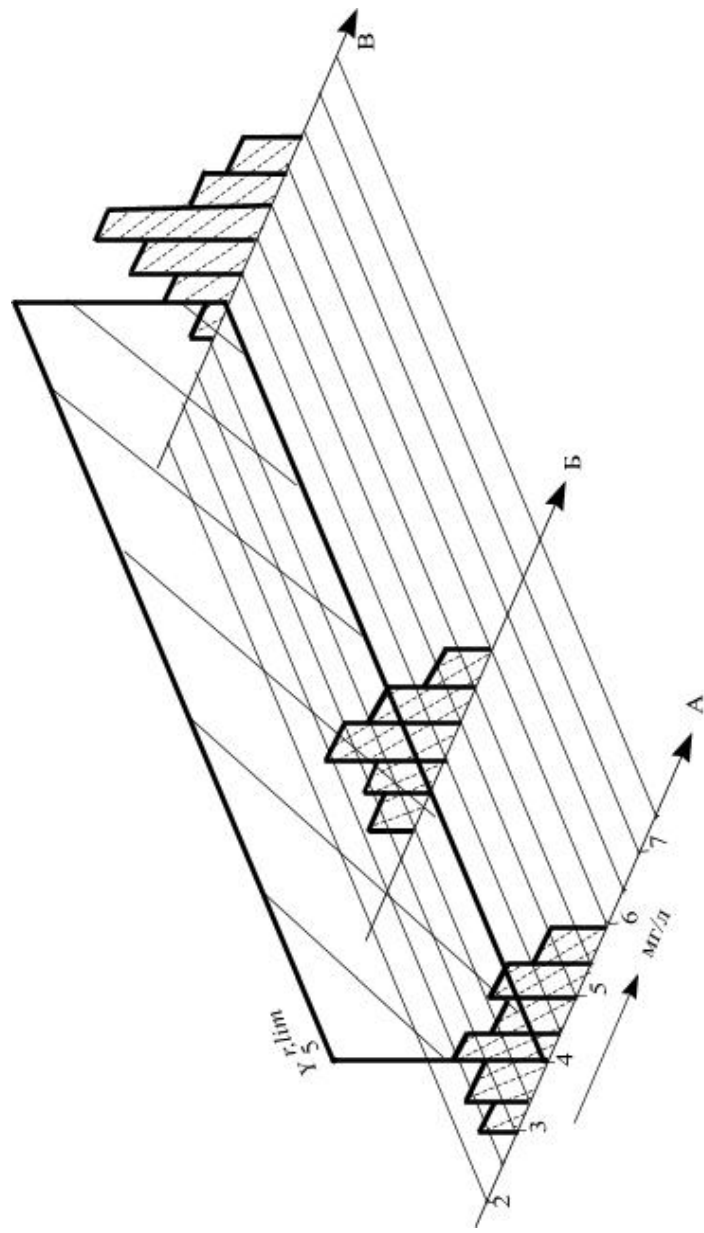


Рис. 4.11 Гистограммы прогнозируемых значений концентрации рас-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии на примере решения задачи синтеза системы обезвреживания сточных вод промышленных предприятий 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.

Были поставлены и решены следующие задачи:

- синтеза системы очистки сточных вод ПТС;
- формирования варианта структуры технологической схемы, в состав которой должны войти все необходимые стадии механической, биохимической очистки и обработки осадка;
- расчета аппаратного оформления для выбранной технологической схемы очистки;
- размещения станции БХО на генплане;
- прогнозирования качества воды в контрольном створе природного водоема (реки).

Использование методологии автоматизированного синтеза системы обезвреживания сточных вод ПТС, предложенной в работе, позволит проектировщикам, студентам и аспирантам при решении конкретных задач проектирования новых и реконструкции действующих станций БХО 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., Тимошук В.С. Использование ЭВМ при проектировании

генеральных планов и объемно-планировочных решений. Л.: Наука, 1982. 226 с.

28. Михалеви́ч В.С., Волкови́ч В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М.: Наука, 1982. 286 с.

29. Найдено́к В.В., Кулако́ва А.П., Скирдо́в 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.

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. Собо́ль И.М., Статнико́в 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 Resource Systems. 1980. P. 57 – 66.**
52. Anderson H.M., Edwarg R.W. A finite differing 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. № 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.

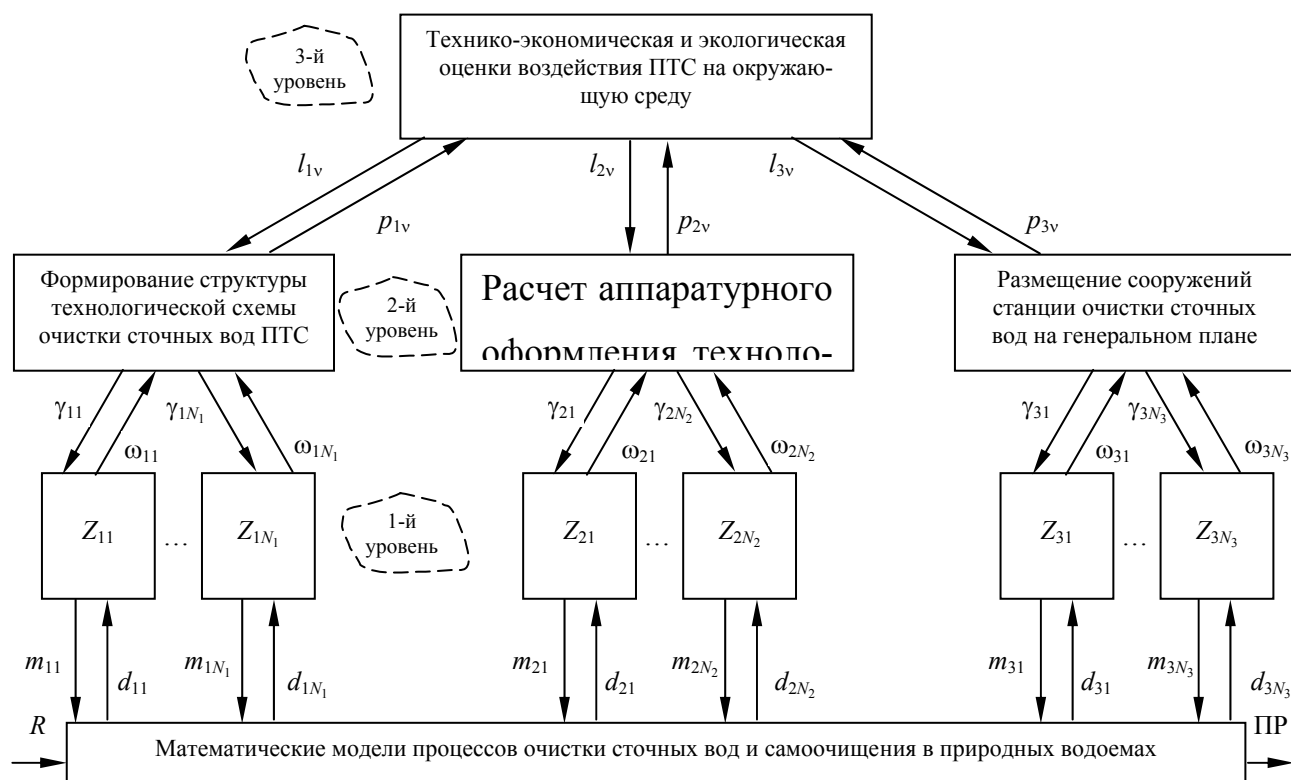


Рис. 1.2 Иерархическая структура автоматизированного решения комплекса задач синтеза сооружений биохимической очистки сточных вод ПТС (Z_{ij} – задачи нижнего уровня)