

Экология

УДК 628.3, 681.5

DOI: 10.17277/voprosy.2021.01.pp.007-025

ИНТЕГРИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ПРОБЛЕМЕ РЕГИОНАЛЬНОГО УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

О. В. Милованова, Н. С. Попов, А. А. Баламутова

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия

Рецензент д-р техн. наук, профессор В. Н. Шамкин

Ключевые слова: имитация; интегрированное проектирование; макросистемы; прогнозирование; управление; устойчивое развитие.

Аннотация: Стратегия управления процессом устойчивого развития сводится к необходимости периодического осуществления структурно-функциональных преобразований в объектах региональной экономики, возникающих вследствие объективного появления качественно новых вызовов (возмущений) со стороны общества и природы. При этом проектирование новых и реконструкция существующих объектов с длительным сроком эксплуатации (более 20 лет) должно быть направлено на превентивное устранение вызовов не только настоящего времени, но и будущего. Отдаленные вызовы необходимо прогнозировать и учитывать для того, чтобы сократить непроизводительные расходы на эволюцию объектов. Рассмотрена задача реконструкции городских очистных сооружений совместно с системой управления, в целях обеспечения их работоспособности в условиях неопределенности будущих вызовов.

Введение

Инфраструктурные системы (ИС) региональной экономики состоят из совокупности комплиментарных подсистем, в общем и целом выполняющих функции обслуживания населения и тесно связанных между со-

Милованова Ольга Викторовна – старший преподаватель кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», e-mail: eso@mail.tstu.ru; Попов Николай Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; Баламутова Анна Андреевна – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ТамбГТУ, г. Тамбов, Россия.

бой процессами динамического взаимодействия, обмена веществом, энергией и информацией. В качестве объектов управления ИС относятся к классу природо-промышленных макросистем [1], характеризующихся иерархичностью, нелинейностью, пространственной распределенностью, запаздываниями в каналах связи, высокой размерностью переменных состояния и недетерминированным поведением отдельных процессов.

В структуре региональной экономики ИС выполняют важнейшую функцию – образуют многосвязное социокультурное и эколого-экономическое пространство, в котором реализуются все жизненно важные потребности населения. Они одновременно являются и «средообразующими», и «артериальными», обеспечивающими движение ресурсов, товаров и услуг от производителя к потребителям.

В составе городских сетей содержатся энергетические, транспортные, информационные, медицинские, жилищно-коммунальные и другие системы, от эффективности и слаженности работы которых зависит уровень цивилизационного развития общества и территорий. Характерной особенностью проектирования ИС является планирование их работы на длительный срок – 25 и более лет, в связи с чем новые поколения граждан оказываются в явной зависимости от качества некогда принятых проектных решений. Отсюда сложность создания новых или реконструкция существующих ИС объясняется, прежде всего, необходимостью учета в долгосрочных проектах запросов еще не рожденных поколений людей, содержание которых на момент принятия решений всегда неизвестно, поэтому «будущие запросы» приходится прогнозировать региональным менеджерам совместно с общественными советами и проектировщиками ИС в аспекте целей устойчивого развития (ЦУР), задействованных в программах перспективного планирования субъектов РФ.

На этапе длительной эксплуатации ИС постоянно возникают качественно новые вызовы (возмущения) со стороны природы и общества, связанные с изменениями климата, технологического уклада, корректировкой законодательства и целей общественного развития, отчего в ИС требуется проводить структурно-функциональные (эволюционные) преобразования. Поскольку такая эволюция должна осуществляться в интересах достижения ЦУР, то ИС следует анализировать с позиций целеустремленных и развивающихся систем региональной экономики.

Типовым примером эволюционирования городских ИС являются очистные системы канализации (ОСК) [2], значимость которых, как и других водных систем, для устойчивого территориального развития, отражена в одной из 17 ЦУР, принятых на Саммите ООН в Нью-Йорке в 2015 году. В частности, Цель № 6 определена как «Обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов и санитарии для всех».

Условная схема организации ОСК представлена на рис. 1.

На примере ОСК г. Тамбова в работах [3, 4] показано, что стратегия долгосрочного управления ИС реализуется в пространстве структурных и функциональных изменений переменных состояния и заключается в последовательном переходе ИС из одного целеустремленного состояния в новое целеустремленное, ориентированное на ЦУР и позволяющее увеличить ожидаемую ценность результатов работы системы в данном состоянии.

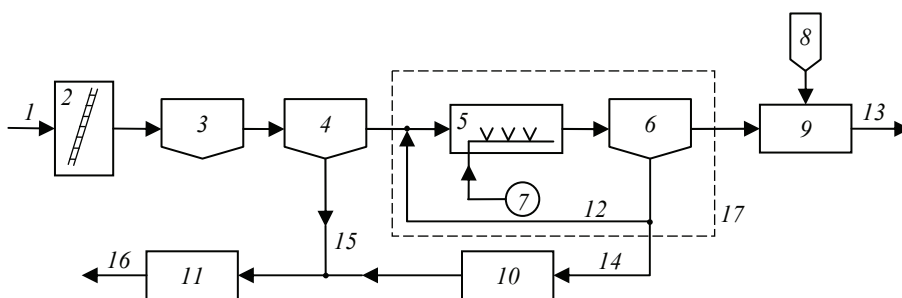


Рис. 1. Схема комплекса очистных сооружений:

1 – входной коллектор; 2 – механическая очистка; 3 – песколовка; 4, 6 – первичный и вторичный отстойники соответственно; 5 – аэротенк; 7 – воздуходувка; 8 – хлораторная; 9 – контактный резервуар; 10 – илоуплотнитель; 11 – метантенк; 12 – рецикл ила; 13 – выпускной коллектор; 14 – избыточный ил; 15 – сырой осадок; 16 – продукты метантенка; 17 – подсистема «аэротенк-отстойник» (А-О)

Переход ИС в очередное целеустремленное состояние на практике означает:

1. Прогнозирование и реализацию структурно-функциональных изменений в системе, вызванных активностью ее внешнего окружения.
2. Разработку системы управления, поддерживающей продвижение ИС к ЦУР.

Исполнение п. 1 базируется на результатах научного прогноза показателей долгосрочного развития ИС, а п. 2 – на анализе и учете действий не только известных в настоящем, но и вероятных в будущем вызовов. При этом необходимо заметить, что существующие методы прогнозирования развития больших систем хорошо известны [5 – 7], тогда как вопросы построения систем управления проектируемыми объектами в условиях неопределенности будущих вызовов нуждаются в серьезной методической проработке. Ответы на эти непростые вопросы следует искать в процедурах совместного прогнозирования и проектирования объектов и систем управления, связанных с решением задач долгосрочного устойчивого развития.

В настоящей работе вопросы совместного или интегрированного проектирования ИС обсуждаются на примере городской станции биохимической очистки (БХО), являющейся ключевой подсистемой ОСК.

Интегрированное проектирование объектов и систем управления ОСК

Проблема очистки городских стоков характеризуется тем обстоятельством, что ОСК требуют очень больших капитальных затрат. Их быстрый возврат в принципе невозможен. Особенно дорого обходится строительство станций БХО, несмотря на то, что только они способны обеспечить глубокую очистку больших масс воды от органических веществ до нормативных значений концентраций. Задача реконструкции ОСК и ее станций БХО в г. Тамбове заключается в переходе на более совершенные технологии очистки стоков от соединений азота и фосфора и переработки осадков,

что позволяет сократить удельные затраты на 1 м³ очищенной воды и 1 т утилизируемых отходов и обеспечить устойчивое развитие централизованной системы водоотведения.

В свою очередь разработка автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) ОСК позволяет существенно снизить эксплуатационные расходы. В первую очередь это касается процессов электропотребления, являющихся основной движущей силой в работе оборудования и самой весомой составляющей в балансе всех видов расходов на эксплуатацию станции. Задача АСУ ТП ОСК заключается в оперативном поддержании на оптимальном уровне ряда факторов, обеспечивающих жизнедеятельность микроорганизмов активного ила в условиях нестационарного притока сточной воды, колебания состава и концентрации органических веществ, содержания кислорода в аэротенке, изменений скорости реакции окисления и т.д.

Согласно Своду правил СП 32.13330.2018 [8], оптимальный вариант очистных сооружений определяется наименьшей величиной приведенных затрат с учетом сокращения расходов материальных ресурсов, трудозатрат, электроэнергии и топлива, а также воздействий на окружающую среду. При этом проектирование новых и реконструкция действующих станций БХО осуществляется на основе исходной информации, полученной по результатам контроля расхода и свойств поступающих сточных вод за период не менее трех лет, с учетом перспективного развития населенных пунктов. Колебания входной нагрузки учитываются с помощью коэффициента суточной неравномерности, отражающего уклад жизни населения, режим работы предприятий, изменения водопотребления по сезонам года и т.п.

Все необходимые данные для расчетов выбираются таким образом, чтобы ожидаемые показатели работы станции БХО были получены с обеспеченностью не ниже 25 %, применительно к среднесуточной (24-часовой) пропорциональной пробе. Результатом проектирования станции БХО являются расчет размеров ее основных и вспомогательных сооружений, составление технологической схемы очистки сточной воды согласно техническому заданию и разработка генерального плана размещения сооружений. В проекте предусматривают равномерное распределение стоков и осадка между отдельными элементами сооружений, средства для измерения расхода сточных вод, осадка, воздуха и биогаза, максимальное использование вторичных энергоресурсов (биогаза, тепла сжатого воздуха и сточных вод) для внутреннего использования на станции БХО, оптимальную степень автоматизации работ. Автоматизированная система управления технологическими процессами должна обладать возможностями дистанционной передачи данных мониторинга состояния технологических процессов в централизованный пункт принятия решений. А в случае использования в аэротенках технологий биологического удаления азота и фосфора, рекомендуется гибкое или ступенчатое управление подачей воздуха в суспензию активного ила.

Анализ СП 32.13330.2018 приводит к следующим выводам.

1. Проектирование станции БХО базируется на статическом режиме ее работы и наилучших (в некотором смысле) внешних условиях. Опера-

тивная гибкость станции, а именно динамика процессов очистки при этом не учитывается, вследствие чего разработанная система стабилизации режимов не сможет обеспечить выполнение других задач, возникающих в реальной ситуации и связанных, например, с перегрузкой станции. В тандеме «проектирование – управление» основное значение имеет проектирование. Несовершенный проект можно лишь частично улучшить с помощью хорошей системы управления, тогда как незначительные изменения в проекте позволяют полностью исключить сложные управленческие операции. Вместе с тем совершенная система управления способна обеспечить эффективную работу станции БХО в условиях экстремальных значений входных нагрузок, требующих перераспределения расхода воздуха по секциям аэротенка, динамических изменений рабочих объемов секций, смены параметров рециклов и т.п. Данные обстоятельства указывают на необходимость использования интегрированного проектирования станции БХО и ее АСУ ТП, основанного на прогнозах будущих вызовов со стороны общества и природы.

2. Рекомендации по проектированию ОСК полностью согласуются с «правилами экологического менеджмента», известными в теории устойчивого развития [11]:

– биологическая очистка стоков позволяет возвращать воду в природный круговой цикл, содействуя, тем самым, доступности водных ресурсов для населения;

– проектирование станции БХО нацелено на минимизацию приведенных затрат и сокращение потребления материально-энергетических ресурсов;

– биологическая очистка способствует восстановлению и использованию полезных ресурсов, содержащихся в сточной воде, таких как тепловая энергия и биогенные вещества.

В конкретных ситуациях проектирование новых или модернизация существующих ОСК базируется на известных или прогнозируемых на ближайшие 10...20 лет значениях входных расходов воды и концентраций содержащихся в ней примесей. Прогнозы на будущее могут основываться на информации о предполагаемом росте населения и увеличении выпуска продукции в бассейне канализования сточных вод.

Для достижения ЦУР в проекте в первую очередь должны использоваться процессы и оборудование, хорошо зарекомендовавшие себя в мировой практике и вошедшие в категорию «наилучших доступных технологий» (НДТ) [9, 10]. Рассмотрим известные НДТ в сфере водоочистки на примере обобщенной технологической схемы (рис. 2), где представлены следующие технологии: 1 – выделение плавающих грубых примесей (процеживание); 1-1 – обработка (отмывка и обезвоживание) грубых примесей, задержанных на решетках (ситях); 1-2 – сбор отбросов, задержанных на решетках (ситях) в контейнеры; 2 – удаление оседающих грубых примесей (песка); 3 – обработка пескового осадка (пульпы) (А – обезвоживание и накопление на песковых площадках, Б – снижение концентрации органики и обезвоживание в аппаратах для отмывки и сепарации песка); 4 – аккумулярование (усреднение расхода) сточной воды; 5 – осаждение взвешенных веществ (осветление, первичное отстаивание); 6 – обработка

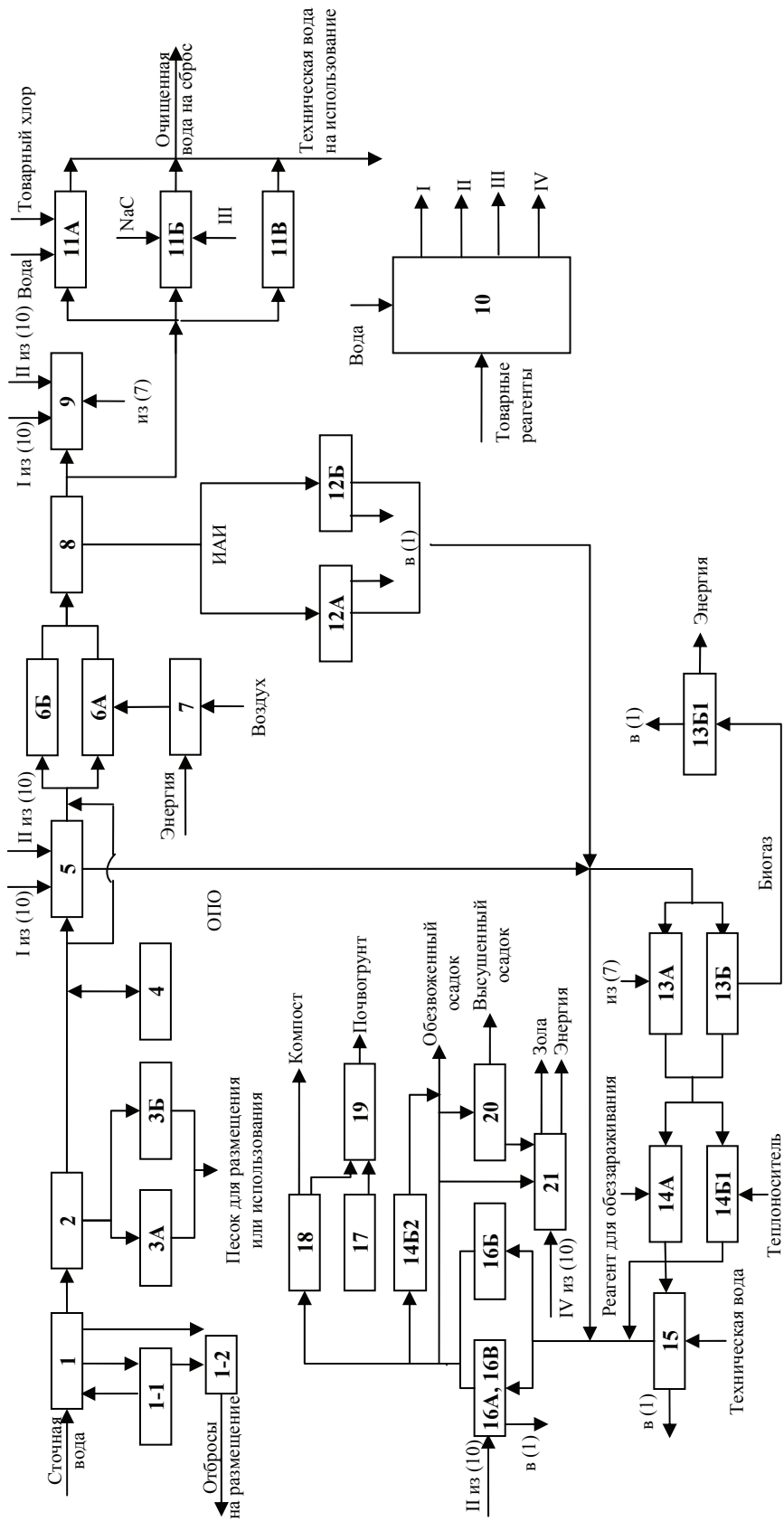


Рис. 2. Обобщенная технологическая схема очистных сооружений городских сточных вод [10]

в биореакторах биологической очистки (А – в аэротенках, Б – биофильтрах); 7 – подача сжатого воздуха; 8 – отделение очищенной воды от биомассы, вынесенной из биореактора; 9 – доочистка; 10 – приготовление и дозирование растворов реагентов; 11 – обеззараживание очищенной либо доочищенной воды (А – хлором; Б – гипохлоритом натрия: вариант 1 – с использованием товарного гипохлорита натрия, вариант 2 – с получением электролитического гипохлорита натрия; В – УФ-облучением); 12 – концентрирование избыточного активного ила (осадков) (А – гравитационное уплотнение; Б – механическое сгущение); 13 – стабилизация жидких осадков (А – аэробная стабилизация; Б – анаэробная стабилизация (метановое сбраживание)); 13Б1 – обработка и утилизация биогаза; 14 – обеззараживание осадков (А – реагентное; Б1 – тепловое обеззараживание жидких осадков; Б2 – тепловое обеззараживание обезвоженных осадков); 15 – уплотнение стабилизированных осадков; 16 – обезвоживание осадка (А – механическое; Б – подсушка и выдержка осадков на иловых площадках в естественных условиях; В – обработка флокулянтами, сгущение, подсушка и выдержка осадков на иловых площадках в естественных условиях); 17 – дополнительная длительная выдержка в естественных условиях осадков, подсушенных на иловых площадках или механически обезвоженных; 18 – компостирование обезвоженных или подсушенных осадков; 19 – производство почвогрунтов из осадков; 20 – термическая сушка осадков; 21 – сжигание (термоутилизация) осадков. Буквами на приведенной схеме обозначены подпроцессы, которые являются альтернативными в ситуации синтеза технологической схемы. К обязательным относятся механическая и биологическая очистки, обеззараживание очищенной воды и обезвоживание осадков. На рисунке 2 введены следующие обозначения: ОПО – осадок первичных отстойников; ИАИ – избыточный активный ил; растворы: I – коагулянта для осаждения фосфора; II – флокулянта; III – гипохлорита натрия; IV – щелочи.

Наиболее важной и одновременно самой чувствительной к внешним воздействиям подсистемой ОСК является биологическая очистка сточных вод активным илом, реализуемая в аэротенках и отстойниках (см. рис. 1). Множество способов биологической очистки объединено в девять основных групп [12]:

1. Традиционная схема очистки сточных вод в аэротенке с подачей в него кислорода воздуха (CAS);
2. Система со ступенчатым вводом воды в аэротенк (SFAS);
3. Система с контактной стабилизацией активного ила (CSAS);
4. Очистка воды в режиме полного перемешивания (CMAS);
5. Очистка воды в режиме продленной аэрации (EAAS);
6. Активация ила чистым кислородом (HPOAS);
7. Очистка воды в мембранном биореакторе (MBRAS);
8. Система очистки с «селекторной» активацией ила (SAS);
9. Последовательная очистка воды в реакторах полного перемешивания с периодическим режимом работы (SBRAS).

В зависимости от состава веществ в сточной воде и требований, предъявляемых к качеству ее очистки, перечисленные биологические способы применяются в различных вариантах НДТ, таких как модифициро-

ванный процесс Лудзака–Эттингера (предвключенная аэрация), ступенчатая нитри-денитрификация (с чередующимися аноксидной и аэробной зонами), карусельная нитри-денитрификация и др. [10].

Выбор способа очистки стоков активным илом напрямую связан с пятью руководящими принципами проектирования технологий [12]. Наиболее значимые приведем в следующей редакции:

– биохимический состав питательной среды определяет природу микробиологического сообщества в биореакторе (аэротенке) и характер производимых им реакций;

– средний возраст ила (SRT) является самым важным параметром проектирования и контроля, выбор которого зависит от проектировщика;

– скорость образования избыточной (приращенной) биомассы является одинаковой для всех систем очистки со взвешенным активным илом при одинаковом SRT и биохимическом составе среды вне зависимости от конструкций биореакторов.

Методика проектирования (расчета) процессов очистки включает ряд этапов [12]:

1. Выбор цели проектирования станции БХО и состава входной нагрузки с учетом максимального, минимального и среднего долговременного значений температуры окружающей среды; максимального, минимального и среднего значений расхода входного потока воды и примесей; определение показателей качества очистки.

2. Перевод величины входной нагрузки, выраженной в БПК₅, в единицу измерения биоразлагаемой части ХПК, более удобную для процесса проектирования.

3. Выбор технологической схемы очистки на основе известных вышеперечисленных биологических способов.

4. Выбор значения SRT по результатам анализа диаграммы работы [12, с. 360].

5. Расчет потребления кислорода в статическом режиме работы станции БХО при максимальной, минимальной и средней температурах, базирясь на технологической схеме CMAS.

6. Расчет ежедневных максимальной и минимальной потребностей в кислороде для исходных данных, представленных в п. 1.

7. Определение объема биореактора в допустимом диапазоне значений, используя модель процесса CMAS. Минимальный объем может быть ограничен либо максимально допустимой объемной скоростью переноса кислорода, либо явлением распада хлопьев, а максимальный объем – возможностями организации режима полного перемешивания. В некоторых ситуациях возникает необходимость в компромиссном решении из-за невозможности удовлетворения каждого из условий в отдельности.

8. На основе значений минимального и максимального объемов, найденных в п. 7, рассчитывают максимальные и минимальные значения концентраций взвешенных веществ в жидкости (MLSS) по модели процесса CMAS.

9. Из анализа компромиссных вариантов затрат на биореактор и вторичный отстойник (или мембранную систему) выбирают концентрацию MLSS в допустимых пределах и вычисляют ассоциированный с ее значением объем биореактора.

10. Рассчитывают скорость образования активного ила на основе модели процесса CМAS.

11. Для процессов с концентрацией MLSS, меняющейся по длине биореактора (например, в схемах CSAS и SFAS), вычисляют распределение кислорода по длине биореактора.

12. Для процессов с изменениями потребностей в кислороде вычисляют распределение кислорода по длине биореактора.

13. Основываясь на результатах п.п. 1 – 12, вносят необходимые уточнения в процесс проектирования и суммируют итоги в табличном виде.

Для проектирования очистных систем с активным илом созданы стандартизированные компьютерные программы различной степени сложности: ASIM, BioBin, GPS-X, West и другие, использующие модель ASM версий № 1, 2d, 3. Данная базовая модель разработана в 1983 году группой специалистов Международной водной ассоциации (IWA) [13]. В состав ASM № 1 входят 8 процессов и 13 компонент, описывающих динамику роста аэробных и анаэробных гетеротрофов, аэробных автотрофов, аммонификацию растворенного органического азота, гидролиз органических частиц, потребление кислорода и т.д. Модель позволяет оценивать влияние кратковременного изменения входной нагрузки на качество выходного потока и рассчитывать пространственно-временные потребности ила в кислороде. В свою очередь одномерная стандартизированная модель отстойника описывает взаимодействие гидравлики, потока в аппарате с процессом осаждения хлопьев ила, что позволяет оценивать эффективность осветления воды и уплотнения иловой массы [14].

Постановку задачи оптимального проектирования станции БХО формализуем следующим образом. Обозначим символом Ω конечное множество допустимых вариантов схем очистки, составленных из подпроцессов рис 2. И пусть мощность множества $|\Omega|$ равна L , а любой вариант $\omega_i \in \Omega$, $i = \overline{1, L}$, содержит j -е число подпроцессов, реализуемых в типовом оборудовании: $\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{ij}, \dots, \omega_{iN_i}$, $j = \overline{1, N_i}$. Вариант технологии ω_i будем оценивать тремя видами затрат: величиной капитальных вложений на строительство и монтаж станции $K(\omega_i)$, расходами на обслуживание и эксплуатацию сооружений $\Xi(\omega_i)$; оперативными расходами на использование электроэнергии $O(\omega_i)$. В качестве целевой функции примем взвешенную сумму дисконтируемых затрат (ДЗ) вида

$$\text{ДЗ}(\omega_i) = \sum_{j=1}^{N_i} (K(\omega_{ij})/v_t) + \sum_{j=1}^{N_i} (\Xi(\omega_{ij}) + O(\omega_{ij})), \quad (1)$$

где $v_t = 1/(1+i)^t$ – коэффициент дисконтирования, отнесенный на временной период t ; i – ставка дисконта. Для рассматриваемого объекта проектирования i может составить 8 – 10 %, а плановый период $t \approx 15 \dots 20$ лет.

Необходимо определить оптимальный вариант схемы очистки, при котором целевая функция (1) достигает минимума

$$\omega_i^* = \arg \min_{\omega_i \in \Omega} ДЗ(\omega_i) \quad (2)$$

и выполняются ограничения:

– на величину биоразлагаемой входной нагрузки подсистемы А-О,

$$F_{in} \leq F_{max}, \quad (3)$$

где F_{max} – максимально допустимый поток взвешенных веществ (**ВВ**) на входе в аэротенк, кг ВВ/(м³·сут);

– качество обработанной воды S_c

$$S_c \leq S_{norm}, \quad (4)$$

где S_{norm} – нормативное значение концентрации ВВ в выходном потоке воды, мг/л;

– средний возраст ила SRT

$$SRT > SRT_{min}, \quad (5)$$

где SRT_{min} – минимально допустимое значение среднего времени пребывания частиц ила в аэротенке, сут;

– концентрацию кислорода в аэротенке C_{O_2}

$$C_{O_2} \geq C_{O_2 min}, \quad (6)$$

где $C_{O_2 min}$ – минимально необходимое значение концентрации кислорода в аэротенке, мг/л;

– величину гидравлической нагрузки на поверхности отстойника F_{Γ}

$$F_{\Gamma} \geq F_{\Gamma min}, \quad (7)$$

где $F_{\Gamma min}$ – минимально допустимое значение входной нагрузки в отстойник, м³/м²/сут;

– твердофазную нагрузку в зоне уплотнения отстойника F_p

$$F_p \leq F_{max}, \quad (8)$$

где F_{max} – максимально допустимое значение потока твердых веществ, кг/м³/сут.

В отличие от задачи проектирования в постановке (2) – (8) типовая методика расчета сооружений ОСК [8] имеет ряд существенных недостатков, вследствие которых проект станции БХО, выполненный на ее основе:

а) не обладает необходимой точностью в случае отклонения действительной входной нагрузки от принятой в техническом задании;

б) не предусматривает межаппаратного взаимодействия процессов;

в) может оказаться не самым экономичным в плане обеспечения действующих стандартов качества очистки.

Решение задачи в постановке (1) – (8) строится на компьютерной имитации работы станции БХО с использованием уравнений динамики

процессов, что крайне важно для понимания того, как меняются ее эксплуатационные затраты в зависимости от колебаний входной нагрузки, процессов осаждения и отведения ила, потребления кислорода. В частности, система аэрации аэротенка составляет примерно 12 % от стоимости строительства станции и сопоставима со стоимостью самого аэротенка. При этом выбор типа энергосберегающей системы аэрации зависит не только от варианта схемы очистки, но и динамических изменений нагрузки на подсистему А-О.

Следовательно, постановку задачи (1) – (8) необходимо дополнить уравнениями связи – математической моделью био-физико-химических процессов, реализуемых в подсистеме А-О, и расчетными зависимостями затрат на строительство, монтаж, эксплуатацию и обслуживание сооружений по каждому типу стандартного оборудования, включенного в схему очистки ω_i . Экономические оценки стоимости оборудования и трудозатрат в системе водоочистки приведены в [15, 16], а типовое содержание финансового плана строительства ОСК показано в работе [17].

Расчеты аэротенка станции БХО г. Тамбова проводились на основе модели ASM № 2 и статической модели отстойника, описываемого дифференциальным уравнением в обыкновенных производных [18]. К ее особенностям следует отнести аналитическое решение с возможностью включения в него экспериментальных данных о скорости осаждения хлопьев ила, явлениях их вымывания и/или осаждения в зависимости от скорости движения воды. В итоге выбраны две схемы глубокой очистки стоков от содержания соединений азота и фосфора: Лудзака–Эттингера и Барденфо, в целях изучения их на предмет использования в проекте реконструкции 2-й очереди станции БХО.

Результаты расчетов подтвердили целесообразность реализации аэробно-аноксидных процессов очистки в проекте реконструкции станции. Но окончательный выбор наилучшей из двух схем зависит от стоимости и эффективности их систем управления, расчет которых возможен в процедуре интегрированного проектирования.

Определение. Под интегрированным проектированием будем понимать совместное решение задач аппаратурного оформления схем очистки и оснащения их необходимыми средствами контроля и управления, в целях создания технологии с минимальными затратами на эксплуатацию и обслуживание, заданными параметрами устойчивости к внешним воздействиям и в строгом соответствии с требованиями технологического регламента.

Если T_i означает технологический оператор i -й схемы очистки, а D_j – оператор типовой системы управления, тогда $R_{ij} = T_i \times D_j$ назовем композицией i -й технологии с j -й системой управления. В таком случае решение задачи интегрированного проектирования связано с нахождением совместного оператора R_{ij} , для которого выполняются требования, сформулированные в *определении*.

Проектирование системы управления обычно решается в несколько этапов [19]: 1 – построение математической модели объекта управления; 2 – выбор устройств неизменной и изменяемой частей системы; 3 – реше-

ние задачи анализа или синтеза; 4 – имитационное исследование системы управления.

Качество системы управления зависит от выбора способа управления, структуры системы управления и значений конструктивных параметров системы управления.

Для нормального функционирования станции БХО необходимы следующие подсистемы управления [20]:

- распределением расхода поступающих сточных вод между параллельно работающими аэротенками;
- расходом возвратного ила в целях поддержания постоянной его концентрации в аэротенке или постоянной органической нагрузки на ил;
- подачей воздуха таким образом, чтобы поддержать заданную концентрацию кислорода во всем объеме аэротенка;
- расходом выводимого из системы активного ила для поддержания возраста или постоянным;
- соотношением объемов аэротенка и регенератора (при сохранении постоянства их суммарного объема) с целью оптимальной регенерации ила;
- расходом ила, выпускаемого из отстойников, чтобы поддерживать в них оптимальный уровень ила и изменять его в зависимости от концентрации и расхода иловой смеси, мутности очищенной отстаиваемой воды и илового индекса;
- а также стабилизация величины рН воды, поступающей в аэротенк на оптимальном уровне.

Перечисленные задачи являются типовыми задачами регулирования режимов водоочистки. Их практическая реализация абсолютно необходима в режиме нормального функционирования станции БХО, но явно недостаточна для решения проблемы устойчивого развития системы централизованного водоотведения. Интегрированное проектирование ОСК и АСУ ТП, результативность которого рассчитана на десятилетия, проводится в условиях высочайшей неопределенности будущих вызовов как для самого объекта, так и для его системы управления. Поэтому в процедуре интегрированного проектирования должны быть учтены по максимуму те внешние обстоятельства, которые могут проявить себя в процессе длительной эксплуатации ОСК.

Решение такой исключительно сложной задачи возможно на основе системного анализа особенностей ОСК как объекта управления, прогнозирования поведения его внешнего окружения природного и антропогенного характера, разработки сценариев появления «проблемных ситуаций», имитационного исследования результатов взаимодействия ОСК и АСУ ТП в рамках спрогнозированных социально-экономических, экологических, технологических и других вызовов и оценки потерь от непринятия нужных для будущих поколений граждан проектных решений. Перечисленные особенности интегрированного проектирования указывают на необходимость усложнения сложившейся схемы проектирования систем регулирования [19] дополнительными пунктами, а именно, «сценарии развития» и «оценка потерь».

Подсистема А-О представляет собой крайне сложный и до конца не изученный объект управления. Процессы в аэротенке непрерывно подвергаются многочисленным внешним воздействиям, часто выходящим за пределы саморегуляции активного ила (некоторые из них неконтролируемы). Более того, динамика процессов биоочистки не однородна и сильно различается по времени отклика на возмущения: расходы сточной воды и кислорода меняются ежесекундно, изменения концентраций субстрата и ила происходят на часовой шкале, а смена состава сообщества микроорганизмов длится сутками и месяцами. При такой «многослойной» динамике фиксация оптимального режима работы в условиях нормального функционирования подсистемы А-О успешно решается с помощью одно- и многоконтурных типовых систем регулирования: с обратными связями, с упреждением, по соотношению, с коррекцией параметров и т.п. В случае, когда происходит смена режима работы подсистемы, поиск новой «рабочей точки» осуществляется в АСУ ТП в результате решения задачи оптимизации с использованием математической модели подсистемы. Наличие такой функции приобретает особое значение в условиях неопределенности внешних воздействий.

Подсистема А-О является термодинамически открытым объектом. Она обладает двумя основными каналами ввода возмущений: сосредоточенным (впускной коллектор) и распределенным (поверхность контакта «вода – воздух» в открытых сооружениях). Через первый канал кроме потока воды и биоразлагаемых органических и неорганических веществ в аэротенк могут попадать токсичные соединения, СПАВ, нефтепродукты и другие примеси, ингибирующие процессы биоокисления и роста массы ила, а через второй – климатические воздействия: температура воды, скорость ветра, солнечная радиация и т.п., ускоряющие или замедляющие процессы биоокисления и осаждения ила в зависимости от погодных условий.

Очевидно, что все отмеченные виды физико-химических воздействий на подсистему А-О инвариантны во времени. Их качественный состав, известный в настоящее время, вполне возможно сохранится в будущем, хотя качественные значения и характер поведения будут меняться в зависимости от развития технологий переработки жидких отходов в промышленности и домашнем хозяйстве. При этом основной вопрос состоит в том, какими функциями должна обладать АСУ ТП, чтобы при наихудших сочетаниях возмущающих воздействий будет гарантирована работоспособность станции БХО. Ответ на данный вопрос содержится в анализе парадигмы «причина – следствие», в которой причиной являются возмущения, а следствием – структурно-функциональные возможности АСУ ТП, позволяющие либо устранить «причину», либо ослабить ее влияние посредством включения в контур управления. Логика причинно-следственных отношений показана в виде последовательности действий на рис. 3. Наибольшее влияние на аэробный процесс окисления органики в аэротенке оказывают следующие параметры: температура T , концентрация кислорода C , рН среды, концентрации токсичных веществ I , соединения азота S_N и фосфора S_P . От данных переменных зависит объемная скорость биологического роста ила r_V

$$r_V = \hat{\mu}f(S)X, \quad (9)$$

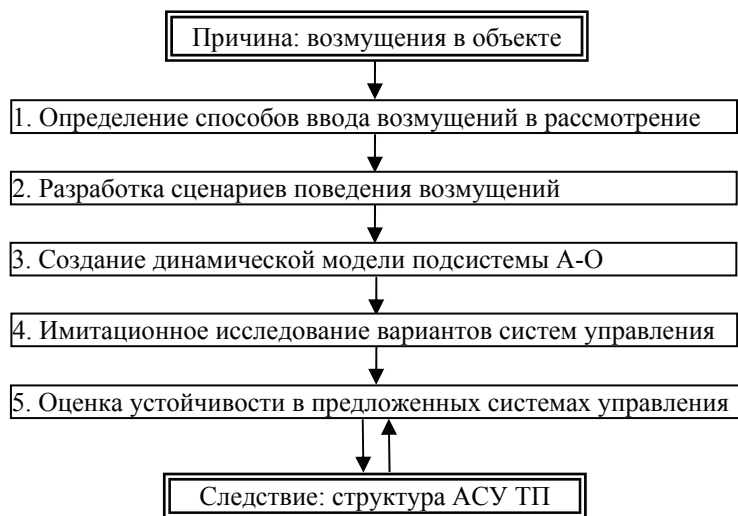


Рис. 3. Алгоритм определения структуры АСУ ТП

где $\hat{\mu}$ – максимальная удельная скорость роста микроорганизмов; $f(S)$ – скорость роста, зависящая от концентрации субстрата S ; X – концентрация биомассы.

В формуле (9) $\hat{\mu}$ рассматривается как константа, найденная при известных значениях переменных состояний внешней среды. Знание зависимости $\hat{\mu}$ от T , C , pH , I , S_N , S_P позволяет ввести указанные переменные в схему анализа и рассчитать их влияние на процессы биоокисления. Некоторые из таких зависимостей приведены в [12, 13].

Разработка сценариев поведения возмущений является ключевым этапом, от которого зависит качество последующих результатов, поскольку необходимо на длительный период времени спрогнозировать входную нагрузку на подсистему А-О, а также изменения T и pH . Решение данной задачи может быть связано либо с использованием характерных образцов поведения возмущений в прошлом (с поправками на будущее), либо «синтетических» данных, имеющих достаточно хорошее обоснование. В последнем варианте могут использоваться модели авторегрессии с дневными, сезонными и годовыми компонентами.

Третий этап связан с созданием или выбором стандартизированной математической модели подсистемы А-О и динамической модели отстойника. Для описания процессов в аэротенке может быть применена упомянутая выше модель ASM. Четвертый этап связан с испытанием проектируемых систем управления различного уровня методом имитации (методом Монте-Карло) работы подсистемы в спрогнозированных на будущее условиях. На пятом этапе проводится оценка устойчивости выбранных систем управления к внешним воздействиям и начальным условиям. В некоторых ситуациях возможен возврат из п. 5 в п. 4 для выбора другого типа системы управления.

В реальных условиях АСУ ТП работают в обстановке случайных помех, непредвиденных изменений параметров технологических процессов и при наличии погрешностей в информационно-измерительных и управ-

ляющих каналах. В результате объективных обстоятельств задачи управления оказываются стохастическими.

Задача синтеза оптимальной программы управления станцией БХО в условиях неопределенности возмущающих воздействий на длительном периоде времени ее работы формализуется следующим образом. Предположим известной систему автоматического управления, описываемую дифференциальными уравнениями вида:

$$\dot{y}_i = f_i(t, y_1, \dots, y_n, u_1, \dots, u_r, z_1, \dots, z_m) \quad (10)$$

с начальными и краевыми условиями

$$y_i(t_i) = y_{i0}, \quad i = \overline{1, n}, \quad t \in [t_0, T],$$

где \dot{y}_i – значения производных по времени выходных переменных объекта управления; u_j – управляющие воздействия; z_k – случайные внешние воздействия, вероятностные характеристики которых полностью не известны; t_i – заданные моменты времени на интервале $[t_0, T]$; f_i – известные нелинейные функции, такие, что найдется хотя бы один вектор управления $\bar{u} = (u_1, \dots, u_r)$, при котором существует единственное решение краевой задачи. При этом предполагаем, что функции u_j принадлежат классу кусочно-непрерывных ограниченных функций на $[0, T]$ и удовлетворяют системе ограничений

$$\psi_j(t, \bar{u}) \leq c_j, \quad j = \overline{1, r}, \quad (11)$$

где c_j – некоторые постоянные числа.

Пусть целевая функция задана в виде

$$Q = M \left\{ \int_{t_0}^T f_0(t, \bar{y}, \bar{u}, \bar{z}) dt \right\}, \quad (12)$$

и выполняется система ограничений

$$M \{ \varphi_l(t, \bar{y}, \bar{u}, \bar{z}) \} \leq 0, \quad l = \overline{1, L}, \quad (13)$$

где M – символ математического ожидания.

Также известны ограничения на возможную реализацию случайных возмущений, действующих на $[t_0, T]$:

$$|z_j| \leq z_{j \max}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (14)$$

где $z_{j \max}$ – некоторые предельные функции времени или постоянные числа.

Поскольку исходная статистическая информация о z_j неизвестна, будем рассматривать z_j в качестве стратегии природы, используя известный подход в теории игр. Смысл решения задачи (10) – (14) состоит в следующем: необходимо определить вектор \bar{z} таким образом, чтобы (12)

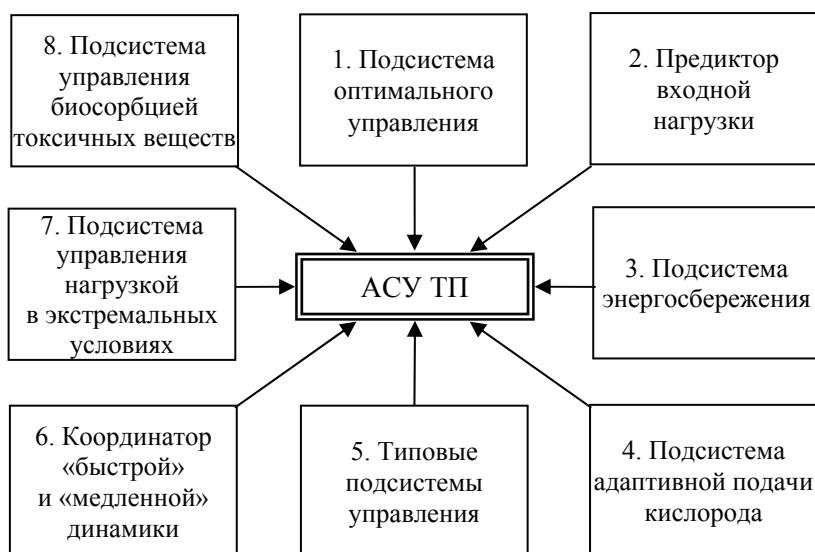


Рис. 4. Состав подсистем управления станцией БХО в условиях неопределенности внешних воздействий

принимала наихудшее значение при любом выборе \bar{u} . А если \bar{u} выбрать из условия достижения максимального значения (12), тогда получим значение \bar{u} , наилучшим образом ослабляющее влияние \bar{z} на объект управления.

Решение задачи управления состоит в том, чтобы найти такое управление \bar{u} , при котором (12) удовлетворяет критерию максимина

$$\min_{\bar{u}} \max_{\bar{z}} Q(f_0, \bar{u}, \bar{z}) = \max_{\bar{z}} \min_{\bar{u}} Q(f_0, \bar{u}, \bar{z}), \quad (15)$$

уравнениям связи (10) с начальными и граничными условиями и ограничениями (11), (13), (14). Данная задача оптимального управления применима к станции БХО, работающей в условиях неопределенности будущих вызовов. Ее решение возможно методами нелинейного программирования.

Структура АСУ ТП станции БХО, на основании отечественного и зарубежного опытов управления процессами биохимической очистки, представлена на рис. 4.

Заключение

На современном этапе жизни общества стратегия управления инфраструктурными системами с длительным сроком эксплуатации является одной из приоритетных задач устойчивого социально-экономического развития регионов. Данная стратегия должна формироваться уже на этапе проектирования инфраструктурных систем совместно с системами менеджмента, способными обеспечить их работоспособность в условиях неопределенности внешних вызовов, препятствующих достижению целей устойчивого развития.

Список литературы

1. Попов, Н. С. Разработка системного подхода к решению региональных задач устойчивого развития / Н. С. Попов, О. В. Пещерова, Л. Н. Чуксина // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 400 – 423. doi: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.400-423
2. Об утверждении схемы водоотведения города Тамбова на период 2018 – 2030 годы : постановление администрации города Тамбова от 01.12.2017 г. № 7445 (ред. от 26.08.2019). – Текст : электронный // КонсультантПлюс. – URL : <http://www.consultant.ru/regbase/cgi/online.cgi?req=doc;base=RLAW444;n=125639#07168087290607599> (дата обращения: 17.02.2021).
3. Попов, Н. С. О некоторых особенностях в постановке и решении региональных задач устойчивого развития. Часть I / Н. С. Попов, О. В. Пещерова, А. А. Чуксин // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2020. – № 2 (76). – С. 91 – 106. doi: 10.17277/voprosy.2020.02.pp.091-106
4. Попов, Н. С. О некоторых особенностях в постановке и решении региональных задач устойчивого развития. Часть II / Н. С. Попов, О. В. Пещерова, А. А. Чуксин // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2020. – № 3 (77). – С. 40 – 55. doi: 10.17277/voprosy.2020.03.pp.040-055
5. Саркисян, С. А. Прогнозирование развития больших систем / С. А. Саркисян, Л. В. Голованов. – М. : Статистика, 1975. – 192 с.
6. Янч, Э. Прогнозирование научно-технического прогресса : пер. с англ. / Э. Янч ; ред. Д. М. Гвишиани. – 2-е изд., доп. – М. : Прогресс, 1974. – 585 с.
7. Лопухин, М. М. Паттерн – метод планирования и прогнозирования научных работ / М. М. Лопухин. – М. : Сов. радио, 1971. – 159 с.
8. СП 32.13330.2018 Канализация. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.03-85. – Текст : электронный. – URL : <http://docs.cntd.ru/document/554820821> (дата обращения: 17.02.2021).
9. ГОСТ Р 56828.12–2016 Наилучшие доступные технологии. Классификация водных объектов для технологического нормирования сбросов сточных вод централизованных систем водоотведения поселений. – Введ. 2017-07-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 5 с.
10. ИТС 10-2019 Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов (с Поправкой). – Текст : электронный. – URL : <http://docs.cntd.ru/document/564068889> (дата обращения: 17.02.2021).
11. Эндрес, А. Экономика природных ресурсов : учеб. пособие / А. Эндрес, И. Квернер ; пер. под ред. Н. Пахомовой, К. Рихтера. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2004. – 256 с.
12. Biological Wastewater Treatment / C. P. G. Leslie, T. D. Glen, G. L. Nancy, D. M. F. Carlos. – Third edition. – IWA Publ. CRC Press, 2011. – 991 p.
13. Очистка сточных вод / М. Хенце, П. Армоз, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван ; пер. с англ. Т. П. Мосолова ; ред. С. В. Калюжный. – М. : Мир, 2004. – 480 с.
14. A Critical Review of Clarifier Modelling: State-of-the-Art and Engineering Practices / B. G. Plósz, I. Nopens, L. Rieger [et al.] // Proceedings of WWTmod2012-3rd IWA/WEF Wastewater Treatment Modelling Seminar, 26 – 28 February, 2012, Mont-Sainte-Anne, Québec, Canada. – P. 27 – 30.
15. Patterson, W. L. Estimating Costs and Manpower Requirements for Conventional Wastewater Treatment Facilities / W. L. Patterson, R. F. Banker // US Environmental Protection Agency : Project No. 17090 DAN ; Contract No. 14-12-462. – USA, 1971. – 252 p.
16. Биологическая очистка производственных сточных вод: процессы, аппараты, сооружения / С. В. Яковлев, И. В. Скирдов, В. Н. Швецов [и др.] ; под ред. С. В. Яковлева. – М. : Стройиздат, 1985. – 208 с.

17. Финансовый план проекта «Строительство очистных сооружений на ... ТЭЦ...». Вариант 1 // ООО «МагистральКонсалтинг». – М. : [б. и.], 2016. – 46 с.
18. Effects of Deposit Resuspension on Settling Basin / T. Takamatsu, M. Naito, S. Shiba, Y. Ueda // Journal of the Environmental Engineering Division ASCE – 1974. – Vol. 100, No. 4. – P. 883 – 903.
19. Топчиев, Ю. И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования : учеб. пособие / Ю. И. Топчиев. – М. : Машиностроение, 1989. – 751 с.
20. Смирнов, Д. Н. Автоматизация процессов очистки сточных вод химической промышленности / Д. Н. Смирнов, А. С. Дмитриев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия : Ленинградское отд., 1981. – 198 с.

References

1. Popov N.S., Peshcherova O.V., Chuksina L.N. [Development of a systematic approach to solving regional problems of sustainable development], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 3, pp. 400-423, doi: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.400-423 (In Russ., abstract in Eng.)
2. <http://www.consultant.ru/regbase/cgi/online.cgi?req=doc;base=RLAW444;n=125639#07168087290607599> (accessed 17 February 2021).
3. Popov N.S., Peshcherova O.V., Chuksin A.A. [On some features in the formulation and solution of regional problems of sustainable development. Part I], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2020, no. 2 (76), pp. 91-106, doi: 10.17277/voprosy.2020.02.pp.091-106 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Popov N.S., Peshcherova O.V., Chuksin A.A. [On some features in the formulation and solution of regional problems of sustainable development. Part II], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2020, no. 3 (77), / pp. 40-55, doi: 10.17277/voprosy.2020.03.pp.040-055 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Sarkisyan S.A., Golovanov L.V. *Prognozirovaniye razvitiya bol'shikh sistem* [Forecasting the development of large systems], Moscow: Statistika, 1975, 192 p. (In Russ.)
6. Yanch E., Gvishiani D.M. [Ed.] *Prognozirovaniye nauchno-tekhnicheskogo progressa* [Forecasting scientific and technological progress], Moscow: Progress, 1974, 585 p. (In Russ.)
7. Lopukhin M.M. *Pattern - metod planirovaniya i prognozirovaniya nauchnykh rabot* [Pattern - a method of planning and forecasting scientific works], Moscow: Sovetskoye radio, 1971, 159 p. (In Russ.)
8. <http://docs.cntd.ru/document/554820821> (accessed 17 February 2021).
9. GOST R 56828.12–2016 *Nailuchshiyе dostupnyye tekhnologii. Klassifikatsiya vodnykh ob'yektov dlya tekhnologicheskogo normirovaniya sbrosov stochnykh vod tsentralizovannykh sistem vodootvedeniya poseleniy* [GOST R 56828.12–2016 Best Available Techniques. Classification of water bodies for technological regulation of wastewater discharges from centralized wastewater disposal systems in settlements], Moscow: Standartinform, 2019, 5 p. (In Russ.)
10. <http://docs.cntd.ru/document/564068889> (accessed 17 February 2021).
11. Endres A., Kverner I., Pakhomova N., Rikhter K. [Eds.] *Ekonomika prirodnnykh resursov: uchebnoye posobiye* [Economics of natural resources: a tutorial], St. Petersburg: Piter, 2004, 256 p. (In Russ.)
12. Leslie C.P.G., Glen T.D., Nancy G.L., Carlos D.M.F. *Biological Wastewater Treatment*, IWA Publ. CRC Press, 2011, 991 p.
13. Khentse M., Armoes P., Lya-Kur-Yansen Y., Arvan E., Kalyuzhnyy S.V. [Ed.] *Ochistka stochnykh vod* [Wastewater treatment], Moscow: Mir, 2004, 480 p. (In Russ.)

14. Plósz B.G., Nopens I., Rieger L. [et al.] A Critical Review of Clarifier Modelling: State-of-the-Art and Engineering Practices, Proceedings of WWTmod2012-3rd IWA/WEF Wastewater Treatment Modelling Seminar, 26 - 28 February, 2012, Mont-Sainte-Anne, Québec, Canada, 2012, pp. 27-30.

15. Patterson W.L., Banker R.F. *Estimating Costs and Manpower Requirements for Conventional Wastewater Treatment Facilities*, USA, 1971, 252 p.

16. Yakovlev S.V., Skirdov I.V., Shvetsov V.N., Bondarev A.A., Andrianov Yu.N., Yakovlev S.V. [Ed.] *Biologicheskaya ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod: protsessy, apparaty, sooruzheniya* [Biological treatment of industrial wastewater: processes, devices, structures], Moscow: Stroyizdat, 1985, 208 p. (In Russ.)

17. *Finansovyy plan proyekta «Stroitel'stvo ochistnykh sooruzheniy na ... TETS...» Variant 1* [Financial plan of the project "Construction of treatment facilities at ... CHP ..."] Option 1], Moscow: [b. i.], 2016, 46 p. (In Russ.)

18. Takamatsu T., Naito M., Shiba S., Ueda Y. Effects of Deposit Resuspension on Settling Basin, *Journal of the Environmental Engineering Division*, 1974, vol. 100, no. 4, pp. 883-903.

19. Topcheyev Yu.I. *Atlas dlya proyektirovaniya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya: uchebnoye posobiye* [Atlas for the design of automatic control systems: a tutorial], Moscow: Mashinostroyeniye, 1989, 751 p. (In Russ.)

20. Smirnov D.N., Dmitriyev A.S. *Avtomatizatsiya protsessov ochistki stochnykh vod khimicheskoy promyshlennosti* [Automation of wastewater treatment processes in the chemical industry], Leningrad: Khimiya: Leningradskoye otdeleniye, 1981, 198 p. (In Russ.)

Integrated Design of Facilities and Control Systems in the Context of Regional Sustainable Development

O. V. Milovanova, N. S. Popov, A. A. Balamutova

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Keywords: imitation; integrated design; macrosystems; forecasting; control; sustainable development.

Abstract: The strategy for managing the process of sustainable development is reduced to the need for periodic implementation of structural and functional transformations in the objects of the regional economy, arising from the objective appearance of qualitatively new challenges (disturbances) from society and nature. At the same time, the design of new and reconstruction of existing facilities with a long service life (more than 20 years) should be aimed at the preventive elimination of challenges not only of the present, but also of the future. Long-distance calls need to be predicted and taken into account in order to reduce the overhead of object evolution. The problem of reconstruction of urban treatment facilities together with a control system is considered in order to ensure their operability in the face of uncertainty of future challenges.

© O. V. Милованова, Н. С. Попов, А. А. Баламутова, 2021