

*На правах рукописи*



**Фоменкова Анастасия Алексеевна**

**МОДЕЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА  
СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ АНАЭРОБНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ  
СТОЧНЫХ ВОД**

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка  
информации, статистика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)».

Научный руководитель:

**КОЛЕСНИКОВА Светлана Ивановна**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры компьютерных технологий и программной инженерии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Официальные оппоненты:

**ШМЕЛЁВ Валентин Валерьевич**

доктор технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры технологий и средств автоматизации обработки и анализа информации космических средств Федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского» Министерства обороны РФ

**СКАТКОВ Александр Владимирович**

доктор технических наук, профессор, профессор Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет»

Ведущая  
организация

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)»

Защита состоится «22» декабря 2022 г. в 14 часа 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.206.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН) по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 14-ая линия В.О., 39, каб. 401. Факс: (812)-328-44-50, тел: (812)-328-34-11.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе аспирантуры (каб. 402а) Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН) и на сайте <http://www.spiiras.nw.ru/dissovet/>

Автореферат разослан «9» ноября 2022 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.1.206.01  
кандидат технических наук



**Абрамов Максим Викторович**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Современные предприятия пищевой промышленности для обеспечения экологической безопасности оборудуются системами анаэробной биологической очистки (САБО) сточных вод, снижающими концентрации органических загрязнений до уровня, допустимого системой водоотведения. **Важной и значимой** задачей является обеспечение их работоспособности при длительной эксплуатации и снижение риска аварийных ситуаций. Для ее решения важен постоянный мониторинг состояния САБО. Особенностью САБО является необходимость совместного учета характеристик неустойчивых биохимических процессов наряду с физическими и техническими параметрами для корректного анализа состояния системы. Поэтому САБО следует рассматривать как сложный биотехнический объект, а различные наборы значений физических, технических и биохимических параметров САБО характеризуют различные обобщенные состояния такого объекта. Таким образом, в диссертации предполагается, что мониторинг состояния САБО представляет собой сложный процесс, в рамках которого осуществляется совместное решение задач контроля, оценивания, диагностики и прогнозирования обобщенного состояния сложного биотехнического объекта.

Высокая структурно-функциональная сложность рассматриваемых биотехнических объектов и отсутствие полного формального описания происходящих в них процессов с учетом состояния биомассы ограничивает использование существующих современных цифровых технологий интеллектуального мониторинга и управления в действующих промышленных системах анаэробной очистки.

Поэтому разработка модельно-алгоритмического обеспечения мониторинга состояния *системы анаэробной биологической очистки* для формирования и реализации научно обоснованных управленческих воздействий, направленных на поддержание требуемого качества очистки и предотвращение нежелательных переходов в нештатные и аварийные состояния, является **новой и актуальной задачей**, решение которой позволит повысить эффективность работы, а также техническую и экологическую безопасность локальных очистных сооружений промышленных предприятий.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросам математического обеспечения мониторинга и анализа состояния систем анаэробной биологической очистки как сложных биотехнических объектов посвящены исследования ведущих специалистов в области процессов анаэробного брожения. Разработка математического описания биохимических процессов анаэробной очистки проводилась в исследованиях С. В. Калюжного, В. А. Вавилина, R. Moletta, D. Batstone, G. Kiely, I. Angelidaki, H. Siegrist, М. Хенце, G. Lyberatos, D. T. Hill, С. L. Barth, на основе которых была разработана модель кинетики анаэробного брожения ADM – 1. Однако, приведенные модели недостаточно учитывают совместное влияние биохимических, тепломассообменных, гидродинамических и системотехнических процессов в анаэробном биореакторе.

В работах D. J. Batstone, J.-P. Steyer, L. Lardon, K. Boe, I. Angelidaki, V. Alcaraz-Gonzalez, M. Hansson изучаются измеряемые параметры анаэробного брожения, несущие информацию о состоянии системы. В работах H. Xiao, M. Madsen, A. Hill, H. Haimi приведены новые методики и приборы для измерения параметров процесса. В работах A. Punal, L. Lardon, J.-P. Steyer, E. F. Carrasco разрабатываются алгоритмы мониторинга состояния анаэробных систем, отыскания причин дестабилизации процессов очистки и их влияния на наблюдаемые параметры процесса. Однако эти исследования ориентированы на технологический процесс очистки без учета влияния технических подсистем САБО, методология системного анализа и диагностики сложных технических систем в приведенных исследованиях используется недостаточно или вовсе отсутствует.

Применительно к решению задач мониторинга технического состояния сложных технических систем в процессе их эксплуатации наиболее значимы работы авторских коллективов научной школы проф. А.К. Дмитриева и проф. Р. М. Юсупова. Теоретические основы разработаны в работах И. А. Биргера, Л. А. Заде, Д. А. Поспелова, А. Н. Аверкина, А. Кофмана и других российских и зарубежных ученых. Значимые научные и практические результаты получены применительно к оценке состояния сложных технических систем Р. М. Юсуповым, Б. В. Соколовым. Разрабатывается и внедряется методология интеллектуального мониторинга и интеллектуальной поддержки принятия решений в работах ведущих ученых, таких, как М. Ю. Охтилев, О. И. Ларичев, А. А. Башлыков, А. П. Еремеев, Т. Саати.

Использование указанных подходов для исследуемых сложных биотехнических систем характеризуется отсутствием общих (универсальных) математических моделей процессов, происходящих в биореакторах различных конструкций, а также соответствующих имитационных моделей для прогнозирования обобщенного состояния системы и выработки рекомендаций по принятию управленческих решений.

Вопросам управления биохимическими реакторами различного назначения посвящены работы В.В. Кафарова, А.Н. Кириллова, Н.С. Жмур, М. Хенце. Управление процессом биологической очистки сточных вод с одновременным наблюдателем состояний рассматривается в исследованиях В.Ю. Невиницына, А.Н. Лабутина, С.Е. Душина, Е.К. Грудяевой, в которых приведены примеры синтеза непрерывных нелинейных регуляторов на базе аналитического проектирования агрегированных регуляторов, полученные в условиях полного описания в пространстве состояний для частных процессов, существенно отличных по сложности математического описания от известных моделей анаэробного брожения.

Таким образом, в современных условиях тематика диссертационных исследований, посвященных разработке модельно-алгоритмического обеспечения мониторинга состояния САБО для вынесения обоснованных решений по обеспечению и поддержанию требуемого качества очистки и предотвращению перехода сложного биотехнического объекта в нежелательные состояния, является актуальной. При этом под *состояниями САБО* в диссертации в общем случае

понимаются их **обобщенные состояния**, которые характеризуются взаимосвязанной совокупностью физических, технических и биохимических параметров.

**Цель и задачи исследования.** Цель диссертационного исследования заключается в повышении качества функционирования систем анаэробной биологической очистки промышленных сточных вод за счет разработки модельно-алгоритмического обеспечения системы мониторинга обобщенного состояния рассматриваемого сложного биотехнического объекта.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1) исследовать особенности мониторинга состояния САБО как сложного биотехнического объекта, в котором одновременно протекают физические, биохимические и технические процессы;

2) разработать и исследовать обобщенную математическую модель системы анаэробной биологической очистки сточных вод как сложного биотехнического объекта;

3) разработать алгоритмы и программное обеспечение мониторинга обобщенного состояния системы анаэробной биологической очистки сточных вод;

4) применить разработанные модельно-алгоритмическое и программное обеспечение для конкретной САБО на основе новой конструкции секционного биореактора предприятия пищевой промышленности.

**Объект исследования:** системы анаэробной биологической очистки сточных вод и модели их описания.

**Предмет исследования:** математические модели анаэробного биореактора, алгоритмы мониторинга обобщенного состояния САБО.

**Научную новизну** работы составляют.

1. Обобщенная математическая модель анаэробного биореактора САБО описывающая его как сложный биотехнический объект, отличающаяся от известных учетом взаимного влияния гидродинамических, тепломассообменных процессов и биохимического преобразования загрязняющих веществ анаэробной биомассой для различных типов используемого оборудования и обеспечивающая комплексное исследование САБО.

2. Алгоритмическое и программное обеспечение аналитико-имитационной модели САБО, отличающееся учетом изменения технических параметров, связанных с жизнедеятельностью биомассы, с одной стороны, и учетом влияния неисправностей технических подсистем очистных сооружений на биохимические процессы САБО, с другой; и применяемое на этапах проектирования САБО, а также мониторинга ее обобщенного состояния с целью своевременного принятия управленческих решений, направленных на поддержание работоспособности в процессе эксплуатации.

3. Структура предлагаемой технологии мониторинга САБО с новой конструкцией секционного биореактора, отличающаяся построением оценки обобщенного состояния системы по измеренным значениям взаимосвязанных технических и биохимических параметров в каждой секции с учетом многостадийности анаэробной очистки, при этом используется сокращенный

набор диагностических признаков, выбранных с использованием критериев минимальной стоимости и максимальной информативности.

**Теоретическая значимость работы** состоит в разработке новой обобщенной математической модели системы анаэробной очистки, в которой на корректном конструктивном уровне формально описываются физические, технические и биохимические процессы, влияющие на работоспособность САБО, а также модели и алгоритмы мониторинга обобщенного состояния САБО как сложного биотехнического объекта.

**Практическую значимость работы составляют:**

1) алгоритмы и реализующее их программное обеспечение для оценивания обобщенного состояния биотехнических подсистем в оборудовании анаэробной очистки, позволяющие сократить число проверяемых диагностических признаков по критериям минимальной стоимости и максимальной информативности;

2) программное обеспечение аналитико-имитационного моделирования системотехнических и анаэробных процессов, характеризующих функционирование САБО как биотехнического объекта, для оценки неизмеряемых параметров по результатам измерений.

3) структура и программное обеспечение мониторинга обобщенного состояния САБО с секционным биореактором, обеспечивающие реализацию основных этапов процесса очистки с наибольшей энергоэффективностью и качеством очистки.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач диссертационного исследования использованы методы системного анализа, методы анализа кинетики развития микробной популяции и массообменных процессов в сложных биотехнических системах, математического, численного и имитационного моделирования, методы технической диагностики сложных технических систем, методология и технологии комплексного моделирования сложных объектов. Реализация разработанных алгоритмов проводилась с использованием программных средств MATLAB, MathCad.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Обобщенная математическая модель анаэробного биореактора САБО, описывающая его как сложный биотехнический объект.

2. Алгоритмическое и программное обеспечение аналитико-имитационного моделирования функционирования САБО.

3. Структура технологии мониторинга обобщенного состояния САБО с новой конструкцией секционного биореактора.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность сформулированных научных положений, основных выводов и результатов диссертации подтверждается согласованностью теоретических выводов и результатов имитационного моделирования, качественным и количественным соответствием теоретических исследований и экспериментальных данных, полученных как самим автором, так и другими исследователями, а также практическим применением результатов исследований.

Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: 6-я

Международная научно-практическая конференция «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии как альтернатива первичным источникам энергии в регионе» (7-8 апреля 2011 г., г. Львов); VI Всеукраинская научно-практическая конференция «Биотехнология XXI столетия» (5 апреля 2012 г., г. Киев); VII Всеукраинская научно-практической конференции «Биотехнология XXI столетия» (24 апреля 2013г., г. Киев); Научная сессия ГУАП, 2012, 2015, 2017, 2019, 2020, 2021 годов, Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2021 (20-22 октября 2021 г., Санкт-Петербург); International Conference «Marchuk Scientific Readings 2021 (MSR-2021) 4-8 October 2021, Novosibirsk, Russian Federation.

Диссертация в полном объеме докладывалась на научно-технических семинарах: СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, 2022; кафедры компьютерных технологий и программной инженерии ГУАП, Санкт-Петербург, 2022. Научные исследования поддержаны грантом РФФИ № 20-08-00747 (2020-2022).

**Реализация и внедрение результатов.** Результаты диссертационного исследования использованы при разработке системы диспетчерского управления очистных сооружений в рамках выполнения проекта по научному направлению «Комплексная переработка минерального, техногенного и растительного сырья с получением функциональных материалов с заданными свойствами» базовой кафедры экологии и экологических проблем химической технологии Владивостокского государственного университета экономики и сервиса (ВГУЭС). Результаты исследований внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров кафедры компьютерных технологий и программной инженерии государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП), Санкт-Петербург, и являлись предметами исследований магистерских диссертаций.

**Личный вклад автора.** Формулировка задач, основных научных положений, выводов исследования, теоретические и практические результаты работы получены и изложены автором самостоятельно.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 19 печатных работ, в том числе 4 в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, из которых 1 входит в библиографическую и реферативную базу Scopus и 1 входит в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science, 1 патент на полезную модель, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Текст работы состоит из введения, 4 глав, заключения списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, списка литературы, содержащего 182 наименования и 12 приложений. Общий объем диссертационной работы – 227 страниц. Работа включает в себя 60 рисунков, 15 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель и задачи исследования. Определены объект и предмет исследования, обозначены методы исследования. Отражены практическая и теоретическая значимость работы, раскрыта научная новизна работы и приведены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертационного исследования.

В **главе 1** проведен анализ структуры, особенностей эксплуатации и организации систем водоотведения и водоочистки. Дана характеристика локальных систем очистки производственных сточных вод, выделена подсистема анаэробной биологической очистки, представляющая собой основной компонент очистных сооружений предприятий пищевой промышленности.

Показано, что САБО можно рассматривать как сложный биотехнический объект. Сделаны выводы о том, что эффективность реализации алгоритмов мониторинга на этапе эксплуатации САБО напрямую зависит от качества анализа наблюдаемого обобщенного состояния исследуемой сложной биотехнической системы. Предложена модель оценивания обобщенного состояния САБО, отличительной особенностью которой является учет деградации биомассы, рассматриваемой на различных ее уровнях (рисунок 1) и влияющей на технические характеристики биореактора.



Рисунок 1 – Структура анализа обобщенного состояния САБО:

$S_{out}$  – концентрация загрязнений в очищенной воде,  $S_{norm}$  – заданная максимальная концентрация загрязнений в очищенной воде,  $V_G$  – производительность системы по биогазу,  $V_{ср}$  – средний расчетный выход биогаза,  $Q$  – расход сточных вод,  $Q_{расч}$  – множество значений расхода жидкости, предусмотренного технологическим процессом,  $CH_4$  – содержание метана в биогазе

**Формализация процессов мониторинга и оценивания состояния САБО** в диссертационном исследовании основана на совместном применении теоретико-множественного подхода и теории динамических систем.



С одной стороны, согласно теоретико-множественному подходу, исследуемый объект может быть формализован в виде следующих кортежей:

$$M_{\text{до}} = \langle T, Z, Y, X, g \rangle, \quad (1)$$

$$M_{\text{оА}} = \langle \text{St}, \Pi, L, P, \Phi \rangle, \quad (2)$$

В представлении (1) САБО как динамического объекта  $g$  – оператор преобразования входных воздействий  $\mathbf{z} \in Z$  в выходные переменные  $\mathbf{y} \in Y$ , для состояния системы  $\mathbf{x} \in X$  в моменты времени  $t \in T$ , в которые наблюдается объект ( $g: T \times X \times Z \rightarrow Y$ ).  $\mathbf{z}, \mathbf{y}, \mathbf{x}$  – векторы входных, выходных переменных и переменных состояния,  $Z, Y, X, T$  – множества значений векторов входных, выходных переменных, вектора переменных состояния и моментов времени наблюдения объекта соответственно. В представлении (2) САБО как объекта анализа  $\text{St}, P, \Pi, L$  – соответственно множества видов обобщенных состояний САБО, вероятностей видов обобщенных состояний  $\text{St}$ , диагностических признаков и интервалов на вещественной числовой оси разброса каждого диагностического признака в каждом из видов обобщенных состояний.  $\Phi: \text{St} \times \Pi \rightarrow L$  – отображение, по которому для каждого признака  $\pi_j \in \Pi$  в каждом из видов обобщенных состояний  $\text{St}_i \in \text{St}$  задается диапазон значений  $l_{ij} \in L$ .

Процесс анализа обобщенных состояния САБО заключается в регистрации значений выходных параметров системы  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_r)'$ , проведении проверок диагностических признаков  $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1, n}\}$ , которые соотносят измеренные значения с заданными интервалами из  $L$ , и принятия решения из  $D$  о состоянии системы. Формально процесс анализа описывается кортежем:

$$M_{\text{ПА}} = \langle Y, \Gamma, P_\Gamma, \Pi, D \rangle, \quad (3)$$

где  $\Gamma$  – сигма-алгебра подмножеств множества  $\text{St}$ ,  $P_\Gamma$  – вероятностная мера на множестве  $\Gamma$ .

С другой стороны, представим САБО как объект класса динамических систем. Обобщенное динамическое состояние САБО  $\mathbf{x}(t)$  есть совокупность определенных физических, технических и биохимических параметров  $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))'$ , изменение значений которых во времени подчиняется некоторому закону эволюции начального состояния системы  $\mathbf{x}(t) = f_t(\mathbf{x}(t_0))$ ,  $t > t_0$ , здесь реализованному системой уравнений

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}(t), \mathbf{z}(t), \mathbf{Par}(t)), \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, t \in [t_0, T_{\text{до}}), \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{H}(\mathbf{x}(t)) + \xi(t), \end{cases} \quad (4)$$

где  $\mathbf{F}()$  – нелинейная вектор-функция, описывающая характер изменения переменных обобщенного состояния, причем для части координат закон их изменения не является известным;  $\mathbf{H}()$  – вектор-функция, описывающая механизм получения выходных переменных в условиях неопределенности  $\xi$ ,  $\mathbf{Par}(t) \in P_{\text{par}} \in \mathbb{R}^w$  – вектор параметров объекта, среди компонент которого могут быть и постоянные величины. Изменению обобщенного состояния во времени  $\mathbf{x}(t)$

сопоставлено движение изображающей точки  $(x_1(t), \dots, x_n(t))$  в фазовом пространстве объекта.

Получаемые оценки наблюдаемого обобщенного состояния системы есть основа для принятия соответствующих управленческих решений по обеспечению заданных режимов функционирования системы.

В диссертационном исследовании анализ эффективности САБО проводится с использованием параметрам времени *HRT* гидравлического пребывания сточной воды в биореакторе, а также не предложенных показателей качества *Qual* и энергоэффективности *Eff* анаэробной очистки.

Обоснована необходимость разработки математической модели, с помощью которой с единых методологических позиций описывается совместное протекание физических, технических и биохимических процессов при анаэробной биологической очистке сточных вод, как основы системы мониторинга, а в перспективе и системы управления.

В главе 2 разработана обобщенная математическая модель анаэробного биореактора, наиболее полно отражающая взаимосвязи физических, технических и биохимических процессов, и являющаяся основой определения параметров процесса очистки на этапах проектирования, формализации диагностических признаков обобщенных состояний системы, разработки системы мониторинга состояния объекта, а также оценивания неизмеряемых параметров анаэробного брожения по измеряемым параметрам, характеризующим функционирование САБО как технического объекта.

Обоснована структура взаимосвязи биохимических, технических и физических процессов, позволяющая разработать корректные алгоритмы оценивания обобщенного состояния системы по параметрам, доступным для измерения (рисунок 2). Здесь: **S** – вектор концентраций веществ в очищаемой воде, **V** – вектор переменных состояния биомассы, **W<sub>x</sub>** – вектор скоростей потока газожидкостной среды в биореакторе, **θ** – вектор показателей тепловых потоков в системе, **P** – вектор концентраций продуктов разложения органического загрязнения сточной воды, *E* – энергия, выделяемая в процессе анаэробного брожения, **x<sub>out</sub><sup>(G)</sup>**, **x<sub>out</sub><sup>(OB)</sup>** – соответственно векторы характеристик биогаза и очищенной воды, **K**, **Pr**, **Term** – соответственно векторы конструктивно-технических параметров САБО, насосного и теплообменного оборудования, *V<sub>B</sub>* – объем биомассы в биореакторе, *L<sub>F</sub>* – толщина биопленки. Индексы in, out, X указывают на значения переменных на входе, выходе системы и в рабочей зоне биореактора.

В работе сформулированы параметры состояния биомассы, характеризующие ее активность и составляющих вектор **V**.

Для общего математического описания анаэробных биореакторов использована известная модель конвективного массопереноса, которая была дополнена составляющими биохимической реакции *r<sub>1</sub>* и *r<sub>2</sub>* (5).

$$\frac{dC}{dt} = D_c \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) - \left( W_x \frac{\partial C}{\partial x} + W_y \frac{\partial C}{\partial y} + W_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - r_1 + r_2. \quad (5)$$

Здесь  $D_C$  – коэффициент молекулярной диффузии вещества  $C$  в жидкости,  $W_x, W_y, W_z$  – составляющие скорости потока жидкости  $\mathbf{W}$  по координатным осям,  $C = C(x, y, z, t)$  – концентрация рассматриваемого вещества,  $r_1$  и  $r_2$  – скорости соответственно разложения и образования рассматриваемого вещества анаэробной микрофлорой.



Рисунок 2 – Взаимосвязь системотехнических, физических и биохимических процессов в САБО

Использована двухстадийная модель преобразования органического вещества анаэробным биоценозом. Уравнение массопереноса (5) применено для каждой из групп веществ на всех стадиях процесса, а также для каждой фазы, в которых существуют эти вещества (жидкость, биопленка, гранула активного ила).

В работе учтено влияние температуры  $\theta$  на физические свойства системы (реологические характеристики жидкости), а также на биохимические процессы (скорость роста микроорганизмов  $\mu$ ), представленное следующими функциональными зависимостями:

$$\mu = \frac{S}{S + K_s + \frac{K_i}{K_i}} \left[ b(\theta - \theta_{\min})(1 - e^{c(\theta - \theta_{\max})}) \right]^2 I_{pH}, \quad I_{pH} = \frac{1 + 2 \cdot 10^{0.5(pH_{\max} - pH_{\min})}}{1 + 10^{(pH - pH_{\min})} + 10^{(pH_{\max} - pH)}}, \quad (6)$$

где  $K_s$  – постоянная полунасыщения субстратом,  $b, c$  – коэффициенты, определяемые эмпирически,  $K_i$  и  $I_{pH}$  – соответственно факторы ингибирования субстратом и кислотностью  $pH, pH_{\min}, pH_{\max}$ .

Предложена обобщенная математическая модель анаэробного биореактора (7), отличающаяся совместным учетом жизнедеятельности биомассы, теплообменными и гидродинамическими процессами для различных типов используемого оборудования.

Модель (7) положена в основу аналитико-имитационной модели САБО, включенной в разрабатываемую далее структуру системы мониторинга обобщенного состояния САБО, поскольку наряду с частично неизмеряемыми

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= D_s \left( \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) - \left( W_x \frac{\partial S}{\partial x} + W_y \frac{\partial S}{\partial y} + W_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) - r_{1S}, \\
 \frac{dP}{dt} &= D_p \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) - \left( W_x \frac{\partial P}{\partial x} + W_y \frac{\partial P}{\partial y} + W_z \frac{\partial P}{\partial z} \right) - r_{1P} + r_{2P}, \\
 \frac{dG}{dt} &= D_G \left( \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} \right) + r_{2G}, \\
 \frac{dB_1}{dt} &= - \left( W_x \frac{\partial B_1}{\partial x} + W_y \frac{\partial B_1}{\partial y} + W_z \frac{\partial B_1}{\partial z} \right) + \mu_1 B_1 - k_{d1} B_1, \\
 \frac{dB_2}{dt} &= - \left( W_x \frac{\partial B_2}{\partial x} + W_y \frac{\partial B_2}{\partial y} + W_z \frac{\partial B_2}{\partial z} \right) + \mu_2 B_2 - k_{d2} B_2, \\
 \frac{dp}{dt} + \rho \left( \frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z} \right) &= 0, \\
 \rho \frac{dW_x}{dt} &= - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{v}{\rho} \left( \frac{\partial^2 W_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_x}{\partial z^2} \right), \\
 \rho \frac{dW_y}{dt} &= - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{v}{\rho} \left( \frac{\partial^2 W_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_y}{\partial z^2} \right), \\
 \rho \frac{dW_z}{dt} &= - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \frac{v}{\rho} \left( \frac{\partial^2 W_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_z}{\partial z^2} \right); \\
 \frac{\partial \theta}{\partial t} + \theta \operatorname{div} \mathbf{W} + \mathbf{W} \operatorname{grad} \theta &= a \nabla^2 \theta.
 \end{aligned} \right. \quad (7)$$

биохимическими характеристиками, содержит доступные к измерению технические параметры САБО (такие, например, как компоненты векторов **Pr, Term, K**):

- $p$  – давление в системе,  $Q_{in}$  – производительность насосного оборудования и  $N$  – полезная мощность механического перемешивающего устройства, определяющие скорость потока жидкости  $\mathbf{W}$ ;
- $\theta$ ,  $a$  – температура и

температуропроводность в системе, соответственно;

• конструктивные параметры системы **K**, определяющие начальные, граничные условия и возможные упрощения системы (7).

Указанные особенности обобщенной модели (7) позволяют использовать ее для большинства типов анаэробных биореакторов. В работе рассмотрены случаи применения модели (7) к типу биореакторов-смесителей и биореакторов-вытеснителей с биомассой в виде биопленки.

Обобщенная математическая модель анаэробного биореактора, дополненная начальными и граничными условиями, а также допущениями, применимыми для конкретной конструкции, позволила выполнить имитационное моделирование работы САБО, результаты которого стали основой разработанных алгоритмов оценивания обобщенного состояния САБО для реального режима непрерывного мониторинга работы системы.

В главе 3 разработаны алгоритмы и реализующие их программы аналитико-имитационного моделирования САБО, реализованные в системе MATLAB и предоставляющие три основных режима моделирования: режим проектирования, режим имитационного эксперимента на модели при запуске или смене режима работы биореактора, а также при его эксплуатации в установившемся режиме.

Использование предложенных в диссертации оригинальных подходов к аналитико-имитационному моделированию в системе мониторинга обобщенного состояния САБО в процессе эксплуатации позволило оценить параметры физических и биохимических процессов, не поддающихся прямому измерению. Предложен алгоритм, позволяющий выполнить оценку биохимических параметров (объем биомассы  $V_B$ , средняя толщина биопленки  $L_F$ ) на основе измерений технических параметров (расход жидкости  $Q_{in}$ , потери давления в биореакторе  $\Delta p$ ).

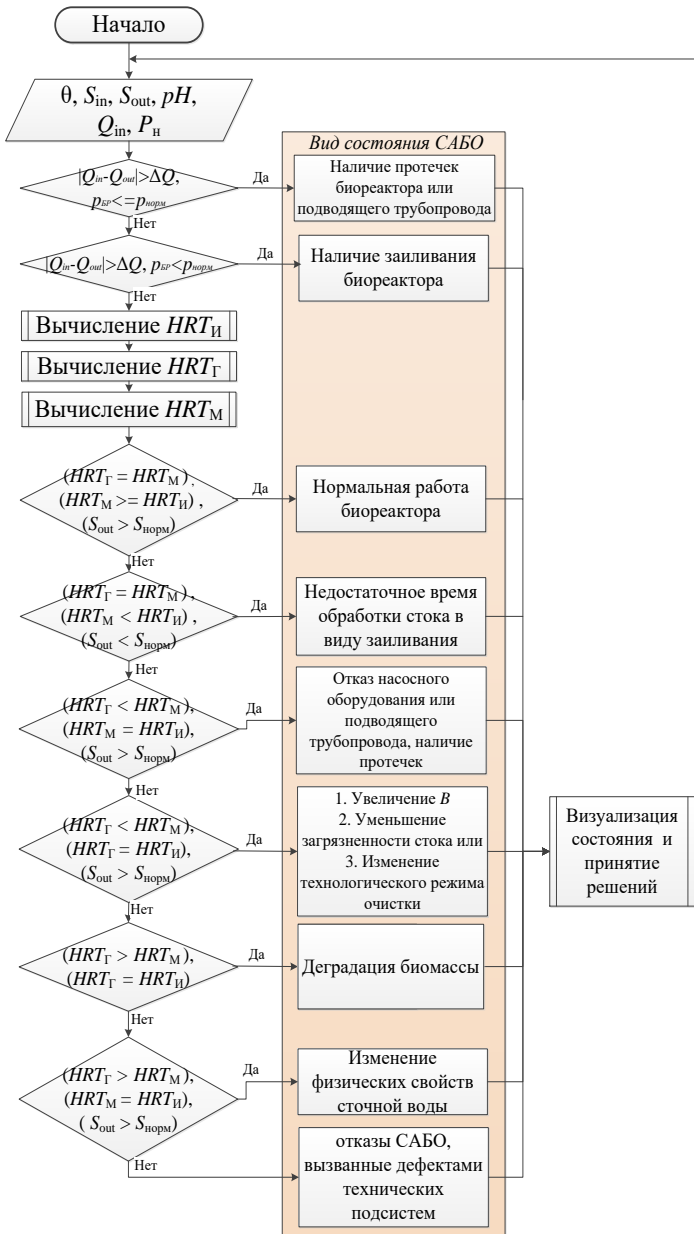


Рисунок 3 – Упрощенный алгоритм мониторинга обобщенного состояния САБО:  $HRT_{И}$ ,  $HRT_{Г}$ ,  $HRT_{М}$  – время гидравлического пребывания стока на очистке, оцененное по имитационной модели, гидравлическому расчету и численному решению ОММ, соответственно

Для выявления отказов САБО и анализа их причин разработан алгоритм мониторинга обобщенного состояния САБО (рисунок 3), предполагающий совместное использование результатов аналитико-имитационного моделирования, гидравлического расчета биореактора и прямых измерений таких технических параметров как: давление над жидкостью  $p_{БР}$ , потери давления  $\Delta p$  в биореакторе, расход сточных вод  $Q_{in}$ , температура  $\theta$ ; биохимических параметров: кислотность  $pH$  среды в биореакторе, концентрация органических загрязнений на входе  $S_{in}$  и выходе  $S_{out}$  системы.

В ходе выполненных исследований установлено, например, что в процессе эксплуатации САБО уменьшение потерь давления  $\Delta p$  в биореакторе косвенно свидетельствует об увеличении рабочего объема аппарата за счет уменьшения биомассы при ее дегградации.

В качестве основного показателя эффективности САБО обоснован выбор времени гидравлического пребывания  $HRT$  сточной воды в системе очистки.

Основной подсистемой САБО, в наибольшей степени

влияющей на ее работоспособность, является биореактор. На основе выделенных в исследовании групп неисправностей технических подсистем, приводящих к деградации наиболее чувствительного элемента биореактора – биомассы, сформированы множества  $St = \{St_i | i = \overline{1,16}\}$  – видов состояний биореактора и  $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1,19}\}$  – диагностических признаков, диапазоны допустимых значений которых определены на основе имитационной модели и экспертных данных для каждого вида состояния  $St_i \in St$ .

Разработаны алгоритмы мониторинга и соответствующее программное обеспечение, позволяющие комплексно оценивать состояние САБО с учетом возможной деградации биомассы, отвечающие критериям наименьшей стоимости и наибольшей информативности проведения проверок диагностических признаков (таблица 1). В таблице 1  $TSS$  – взвешенные вещества в очищенной воде,  $VFA_{total}$  – концентрация летучих жирных кислот.

Таблица 1 – Минимальные наборы диагностических признаков, необходимых для оценивания обобщенного состояния САБО при деградации биомассы

	Физико-технические параметры	Биохимические параметры
По стоимости проверок	$Q_{in}, \theta$	$V_G, pH, S_{out}, CH_4, TSS$
По информативности проверок	$Q_{in}, \theta$	$V_G, VFA_{total}, S_{out}, CH_4, TSS$

Эксплуатационные характеристики САБО существенно зависят от необходимости проведения лабораторных исследований. Разработан алгоритм последовательного измерения диагностических признаков, представленный в виде ориентированного графа (рисунок 4), позволяющий установить причину деградации популяции микроорганизмов. Показано, что с учетом вероятности пребывания системы в каждом из состояний  $St_i \in St$ , число необходимых лабораторных исследований может быть снижено до 30%. Вероятности пребывания САБО в каждом из состояний  $St_i \in St$  определены с помощью имитационного моделирования в предположении нормально распределенных возмущающих воздействий, возникающих в виду отказов технических подсистем или нарушения технологического режима очистки и приводящих к деградации биомассы. При отсутствии явных нарушений технологического режима очистки (залповые выбросы сточных вод по объему и/или концентрации, выбросы токсических веществ и т.п.), деградация биомассы свидетельствует о неисправностях технических подсистем очистных сооружений: насосного оборудования и трубопроводов, оборудования механической очистки, теплообменного оборудования, оборудования физико-химической обработки сточных вод, усреднителей. Граф проведения проверок диагностических признаков (рисунок 4) позволяет установить наличие отказа, приведшее к деградации биомассы, с точностью до подсистемы.

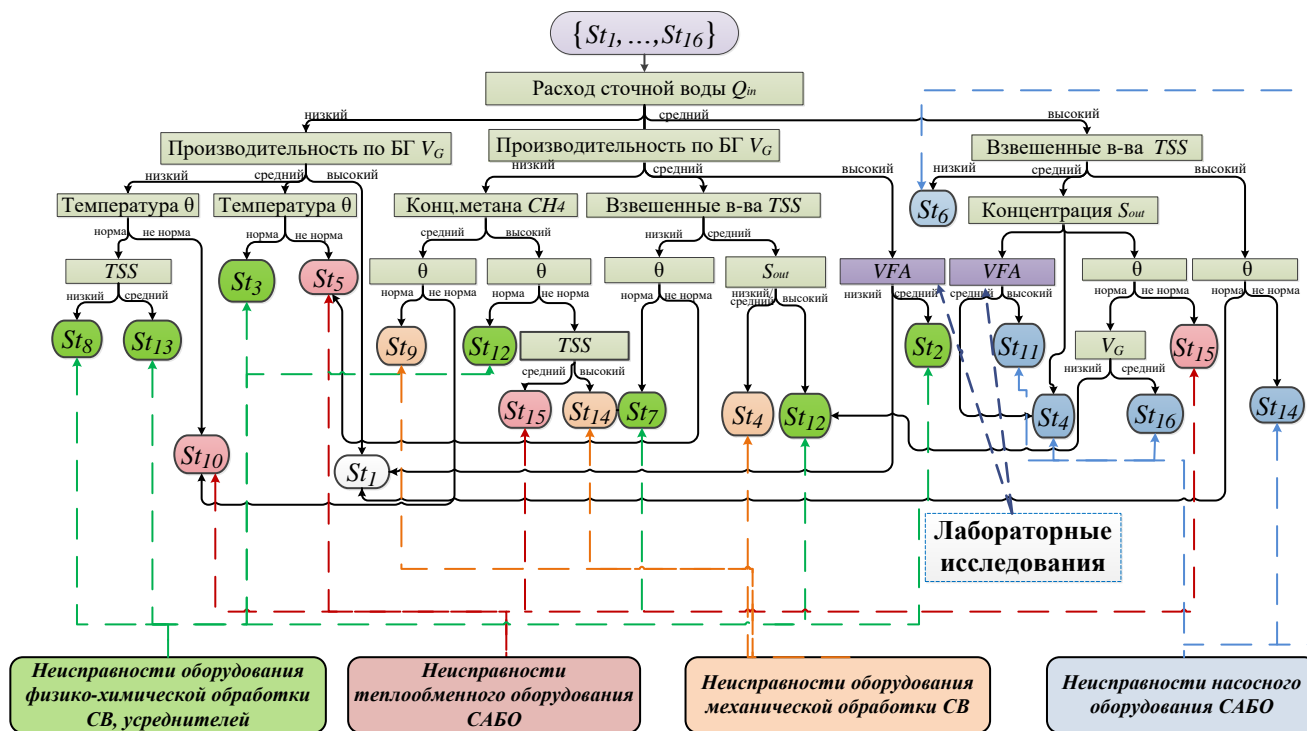


Рисунок 4 – Ориентированный граф проведения проверок диагностических признаков в процессе мониторинга САБО

Разработанная программа имитационного моделирования САБО позволяет выполнить анализ обобщенного состояния в соответствии с рисунками 3-4, а также по известным методикам поиска отказов в анаэробных системах. Исследование аналитико-имитационной модели показало, что время обнаружения нежелательных состояний системы при использовании разработанных алгоритмов мониторинга САБО сокращается в среднем на 18%. Это позволит своевременно вырабатывать решения для недопущения потери работоспособности и сохранения заданного режима функционирования системы очистки, сократить временные и материальные ресурсы, и, таким образом, повысить качество функционирования САБО в процессе длительной эксплуатации.

Разработаны программные модули решения задачи автоматизированного анализа информации в системе диспетчерского управления процессом анаэробной очистки сточных вод по предложенным алгоритмам (рисунки 3, 4).

В главе 4 рассмотрено применение обобщенной математической модели и алгоритмов мониторинга обобщенного состояния на ее основе к конкретному типу САБО с секционным анаэробным биореактором предложенной конструкции (рисунок 5). Разработана структура системы мониторинга для конкретного предприятия пищевой промышленности.

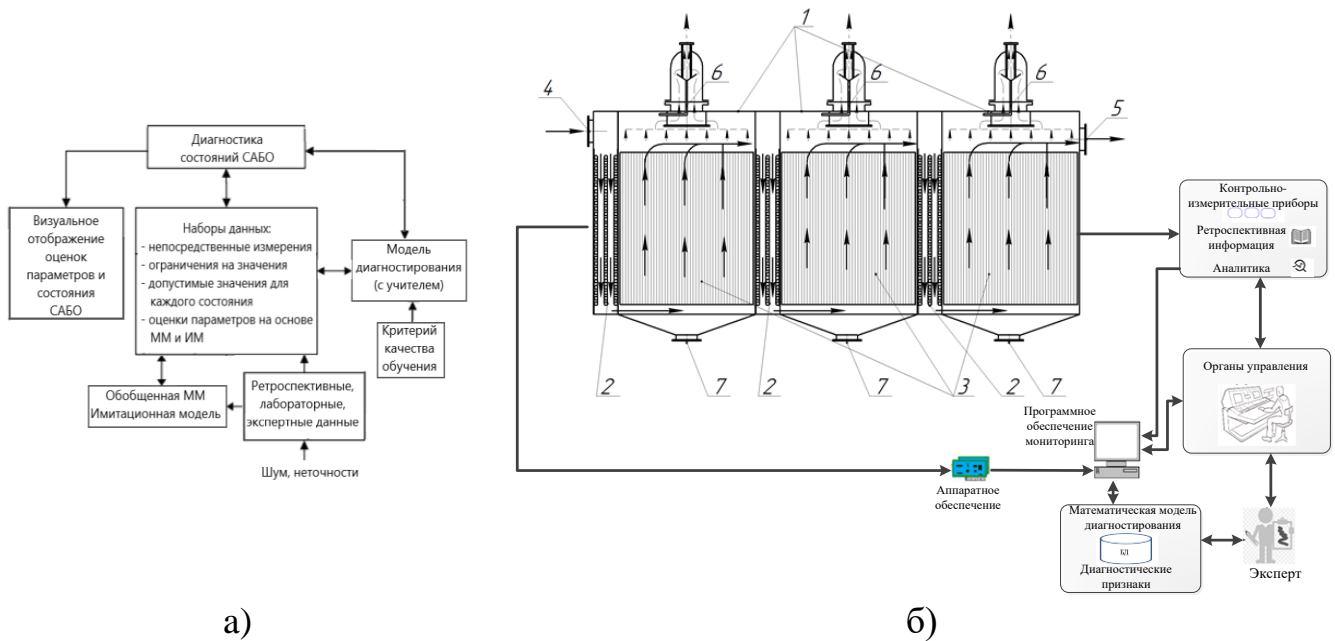


Рисунок 5 – а) Структурная схема используемой модели диагностирования; б) принципиальная схема секционного гибридного биореактора с прикрепленной на неподвижных плоскостных носителях биомассой и информационного взаимодействия с системой контроля

На основе проведения ряда экспериментов с имитационной моделью (глава 3) данного типа САБО с пятисекционным биореактором получена выборка значений основных показателей эффективности, оценивающих качество очистки  $Qual$ , энергоэффективность  $Eff$ , время  $HRT$  гидравлического пребывания сточной воды на очистке в зависимости от температурных режимов процесса по секциям. В результате двухкритериального оценивания показателей эффективности ( $Eff$  и  $HRT$ ) с ограничением на качество очистки  $Qual$ , в процессе проведения серии экспериментов на аналитико-имитационной модели САБО, найдены значения температурных режимов по секциям биореактора, приводящих к энергоэффективности  $\sim 10\%$  при уменьшении времени  $HRT$  гидравлического пребывания сточной воды на очистке на  $\sim 20\%$  (что равносильно повышению производительности системы по сточной воде  $Q_{in}$  до  $20\%$  или уменьшению рабочего объема биореактора  $V_p$  до  $20\%$ ).

Для исследуемой конструкции анаэробного биореактора разработана общая структура предлагаемой технологии мониторинга обобщенного состояния, системно учитывающая взаимосвязанные физические, технические и биохимические процессы, представленная на рисунке 6.

Таким образом, для получения оценки обобщенного состояния САБО одновременно используются результаты измерений как технических параметров биореактора, так и результаты анализа протекающих в нем биохимических процессов.



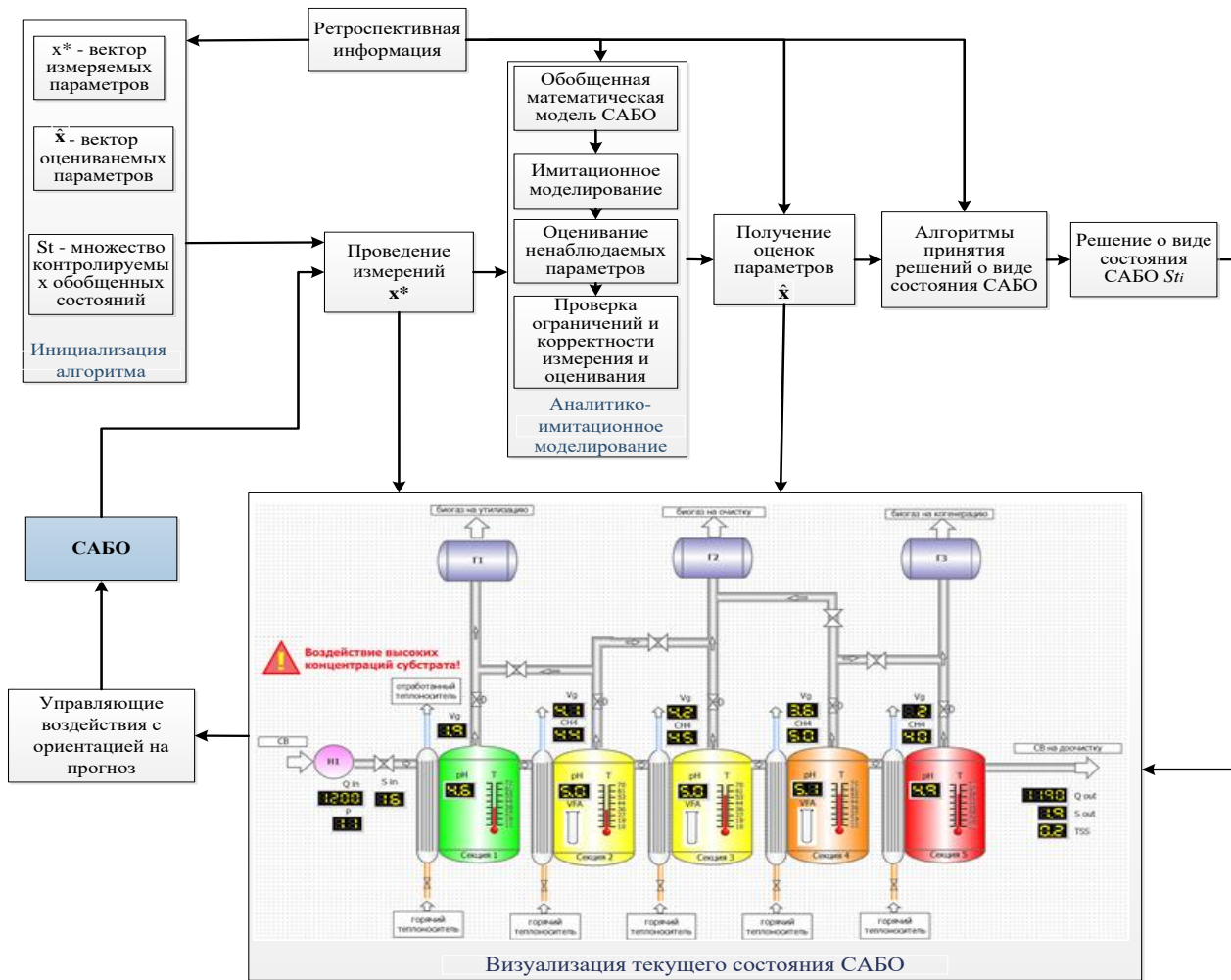


Рисунок 6 – Структура предлагаемой технологии мониторинга обобщенного состояния САБО и пример визуализации на мнемосхеме состояния  $S_{t7} = \{\text{Воздействие высоких концентраций субстрата}\}$

На основе результатов численных расчетов и имитационного моделирования в диссертационном исследовании получены аппроксимирующие зависимости, описывающие взаимосвязь эффективности работы секционного биореактора от входных воздействий. Рассмотрена возможность определения законов управления САБО для достижения при проведении соответствующих исследований заданных целевых состояний на основе метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов.

В **заключении** сформулированы основные теоретические и практические результаты и выводы, полученные в ходе диссертационного исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании решена актуальная и важная научно-практическая задача разработки модельно-алгоритмического обеспечения мониторинга обобщенного состояния локальной системы очистки сточных вод, содержащих органические загрязнения, с целью повышения качества функционирования САБО при ее длительной эксплуатации и своевременного принятия управленческих решений по обеспечению заданных режимов работы.

На базе существующего математического аппарата оценивания и технической диагностики состояния сложных технических объектов с единых методологических системно-кибернетических позиций разработаны алгоритмы оценивания состояний качественно и структурно разнородных подсистем (физической, биохимической, технической) САБО, что определило возможность корректной организации взаимодействия между ними, учета влияния внешней среды для создания системы мониторинга с целью поддержания работоспособности рассматриваемого сложного биотехнического объекта и снижения аварийности системы.

Все поставленные задачи для реализации основной цели исследования решены, получены следующие новые научно-практические результаты, составляющие **итоги выполненного исследования**:

1. Предложена обобщенная математическая модель анаэробного биореактора, учитывающая физико-химические, технические и биологические процессы в системе анаэробной биологической очистки, и позволяющая для различных конструкций биореакторов обеспечить определение параметров процесса очистки на этапах проектирования и эксплуатации, а также формализовать и конструктивно использовать диагностические признаки состояний системы при ее практическом применении.

2. Разработана система оценивания обобщенных состояний САБО на общесистемных принципах для выявления и контроля устойчивых закономерностей функционирования исследуемого сложного биотехнического объекта, реализованная с использованием алгоритмов технической диагностики применительно к проектированию прототипа анаэробного биореактора в системах очистки сточных вод.

3. Разработаны структура, алгоритмы и реализующая их программа мониторинга обобщенного состояния САБО с новой конструкцией анаэробного биореактора для эффективного использования в качестве локальных очистных сооружений предприятия пищевой промышленности.

**Рекомендации по использованию полученных результатов.** Результаты диссертационного исследования, а именно разработанный комплекс алгоритмов анализа обобщенного состояния, позволяют своевременно выявить и парировать исправности различной природы, в том числе вызывающие деградацию биомассы в биореакторе, и могут быть использованы

– в автоматизированных системах управления технологическим процессом очистки,

– при проектировании и выборе технических средств реализации системы мониторинга,

– в системах поддержки принятия решений при эксплуатации анаэробных систем очистки производственных сточных вод.

Результаты проведенных исследований имеют большую теоретическую и практическую значимость, обеспечивают за счет применения разработанного модельно-алгоритмического аппарата системы мониторинга:

– повышение надежности и экологической безопасности систем анаэробной биологической очистки сточных вод предприятий пищевой промышленности;

- сокращение времени обнаружения нежелательных состояний системы до 18% по сравнению с известными алгоритмами мониторинга САБО;
- уменьшение рабочего объема биореактора до 20%, повышение производительности системы по сточной воде до 20%;
- увеличение энергоэффективности САБО до 10%;
- снижение до 30% числа необходимых лабораторных исследований при эксплуатации САБО, что в совокупности приводит к стабильному повышению качества функционирования системы анаэробной очистки сточных вод в процессе длительной эксплуатации.

**Дальнейшие перспективы разработки тематики диссертационного исследования** связаны, прежде всего, с решением следующих задач:

- разработка алгоритмов прогнозирования обобщенного состояния САБО и поддержки принятия решений при эксплуатации системы очистки;
- синтез алгоритмов управления процессом очистки, позволяющих привести систему к новому устойчивому состоянию с заданными характеристиками;
- разработка алгоритмов анализа правильности функционирования системы анаэробной биологической очистки при запуске системы или при смене режимов ее работы.

Представленные результаты соответствуют содержанию специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук**

1. Фоменкова А. А. Анализ работоспособности систем анаэробной биологической очистки сточных вод в процессе эксплуатации // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 140-147. . (RSCI на платформе Web of Science)
2. Ключарёв А.А., Фоменкова А.А. Проектирование секционного анаэробного биореактора // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2018. № 43 (69). С. 95-100. (РИНЦ)
3. Ключарёв А.А., Фоменкова А.А. Математическая модель анаэробного биореактора с закрепленной биомассой как объекта управления // Информационно управляющие системы. 2019. №2. С.44-51. 51 (Scopus, RSCI на платформе Web of Science)
4. Фоменкова А.А., Ключарёв А.А., Колесникова С.И. Синтез системы управления, мониторинга и оценивания состояния анаэробного биореактора // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. №1 (25). С. 21-34. (РИНЦ)

### **Публикации, которые приравниваются к рецензируемым научным изданиям**

5. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ №2021613417. Программный модуль для имитационного моделирования системы анаэробной очистки сточных вод. А.А. Фоменкова, А.А. Ключарёв. №2021612722, заявл.09.03.2021.

6. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ №2021669208. Программный модуль для идентификации видов технического состояния анаэробного биореактора. А.А. Фоменкова. № 2021668776, заявл.25.11.2021.

### **Публикации в научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования (Web of Science и Scopus)**

7. Fomenkova A. A., Klucharev A. A., Kolesnikova S. I. Formalization of target invariants and designing an adaptive control system for the model of anaerobic biological wastewater treatment // Published under licence by IOP Publishing Ltd Journal of Physics: Conference Series, Volume 2099, International Conference «Marchuk Scientific Readings 2021 (MSR-2021) 4-8 October 2021. – Novosibirsk, Russian Federation, 2021. – 9 p. (Scopus)

### **Публикации в иных изданиях**

8. Ружинская Л.И., Фоменкова А.А. Математическое моделирование процессов анаэробного сбраживания органического субстрата. Обзор // Scientific Journal «ScienceRise». – 2014. - №4/2(4) – С.63-69.

9. Ружинская Л.И., Фоменкова А.А. Моделирование процессов переноса в анаэробном биореакторе с иммобилизированной микрофлорой // Scientific Journal «ScienceRise». – 2014. - №4/2(4) – С.52-59.

10. Фоменкова А.А. Математическая модель оптимизации процессов переноса в анаэробном биореакторе с закрепленной биомассой // Оптимізація виробничих процесів: зб. наук. пр. Вип. 15/2014. — Севастополь, 2014. – С.283-288.

11. Фоменкова А.А., Ключарёв А.А. Имитационное моделирование при определении технического состояния систем анаэробной биологической очистки // Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021). Труды конференции (электронное издание), 20–22 октября 2021 г., Санкт-Петербург: АО «ЦТСС», 2021. – 694 с. – ISBN 978-5-905526-05-3. С. 444-449.

12. Колесникова С.И., Цветницкая С.А., Фоменкова А.А. Метод интегральной адаптации для компенсации возмущений при моделировании системы анаэробной биологической очистки. Современные наукоемкие технологии. № 5 (часть 2) 2022, стр. 197-203.

13. Фоменкова А.А., Ключарёв А.А., Ельцова А.Д. Система контроля технического состояния анаэробного биореактора // Обработка, передача и защита

информации в компьютерных системах '22: Вторая международная науч. конф. (СПб., 14-22 апреля 2022г.): сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2022. – С. 106-108.

14. Фоменкова А.А. Выбор минимального набора диагностических признаков при анализе технического состояния биомассы в системе биологической очистки сточных вод // Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах: Международная науч. конф. (СПб., 14-22 апреля 2021г.): сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2021. – С. 82-86.

15. Ключарёв А.А., Фоменкова А.А. Задачи определения технического состояния системы очистки сточных вод // Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах: Первая Всерос. науч. конф. (СПб., 14-22 апреля 2020г.): сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2020. – С. 70-74.

16. Фоменкова А.А. Обобщенная математическая модель анаэробного биореактора для очистки сточных вод // Научная сессия ГУАП, Сборник докладов. В 3-х частях. Часть II, Технические науки. СПб, 2019. Издательство: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Санкт-Петербург) – С. 347-351.

17. Ключарёв А.А., Фоменкова А.А. Особенности анализа массопереноса в системах с дополнительным потоком массы // НАУЧНАЯ СЕССИЯ ГУАП Сборник докладов. В 3-х частях. Часть II, Технические науки. СПб, 2016. Издательство: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Санкт-Петербург) – С. 201-207.

18. Ключарёв А.А., Фоменкова А.А. Имитационное моделирование процессов массопереноса в анаэробном биореакторе // НАУЧНАЯ СЕССИЯ ГУАП Сборник докладов. В 3-х частях. Часть II, Технические науки. СПб, 2015. Издательство: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Санкт-Петербург) – С. 216-221.

### **Патент на полезную модель**

19. Пат. UA 93476 U Украины, МПК (2014.01) C02F 11/00. Анаэробный биореактор для очистки сточной воды, Л.И. Ружинская, А.А. Фоменкова: заявитель и патентообладатель: Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт». № u 2013 14720; заявл. 16.12.13; опубл. 10.10.14, Бюл. № 19. – 3 с.

*Автореферат диссертации*

ФОМЕНКОВА

Анастасия Алексеевна

**МОДЕЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА  
СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ АНАЭРОБНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ  
СТОЧНЫХ ВОД**

Текст автореферата размещен на сайтах:

Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего  
образования Российской Федерации

<https://vak.minobrnauki.gov.ru/>

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской  
академии наук»

<http://www.spiras.nw.ru/dissovet/>

Подписано в печать "20" октября 2022 г.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл.печ.л. 1,0. Тираж 100 экз.

Заказ № \_\_\_\_