

УДК 628.3:621.3

Функционально-статический анализ системы контроля водоотведения и оценка подходов к её цифровому моделированию

В. Н. Штепа

д.т.н, доцент, Полесский государственный университет,
shtepa.v@polessu.by, OrcID: 0000-0002-2796-3144, SPIN-код: 2834-2138

Аннотация

Функционально-статический анализ системы контроля водоотведения и оценка подходов к её цифровому моделированию. Оценены актуальная ситуация экологической безопасности водоотведения населённых пунктов и разработки других авторов в данной проблемной области, исходя из результатов анализа обосновано важность построения информационной системы оперативного контроля параметров канализирования сточных вод. Проведены функциональное (методология IDEF0) и статическое (нотация UML) моделирования процесса контроля параметров водоотведения, позволившие сформировать структуры специализированных программно-аппаратных решений. Создана схема итерационного жизненного цикла цифровой модели (цифрового двойника) управления водными ресурсами объектов водопользования.

Введение

Согласно ЭкоНП 17.06.06-005-2022 устанавливаются требования по обеспечению экологической безопасности при эксплуатации очистных сооружений (ОС) с механической, биологической и физико-химической очисткой сточных вод (СВ), в том числе по эффективности удаления загрязняющих веществ, а также сооружений обработки осадков сточных вод. Одновременно в соответствии с пунктом 7 статьи 47 Водного кодекса Республики Беларусь, сброс всех видов СВ с использованием рельефа местности (оврагов, карьеров, балок и иных подобных выемок в грунте), а также на избыточно увлажненные территории (болота) не допускается. Сброс сточных вод в окружающую среду должен осуществляться исключительно в установленные приемники через систему канализации с предварительной их качественной обработкой. Нормативные требования обеспечения экологической безопасности геоэкосистем фигурируют и в Постановлении Совета Министров Республики Беларусь 04.09.2019 № 594 «Правила технической эксплуатации систем питьевого водоснабжения и водоотведения (канализации) населенных пунктов».

Вместе с тем системные залповые и неконтролируемые поступления на очистные сооружения токсикантов и других опасных соединений в составе СВ вызывают гибель активного ила, при этом попытки его реанимирования (загрузкой активного ила с других очистных сооружений либо внесением биостимулирующих агентов) оказываются часто

неэффективными. Среди основных причин, которые не позволяют наладить эффективное экологическое управление сетью водоотведения в целом, включая коммунальные очистные сооружения – незначительное количество измерительных средств, способных оперативно функционировать в сегментах сети водоотведения (колодцы, коллектора, насосные станции, напорный трубопровод), а также методик формирования распределённой структуры средств измерения, принципов и подходов импактного мониторинга применительно к объекту исследования в условиях неполноты получаемой информации о качестве СВ.

Такая проблематика актуальна для ОС всех регионов Республики Беларусь, поскольку существующие комплексы в городах и районных центрах страны построены преимущественно в 70-е годы прошлого века (всего функционирует 1470 коммунальных очистных сооружений, установленной мощностью 3,45 млн. куб. метров в сутки), имеют большой физический износ и не могут обеспечить выполнение современных требований к качеству очистки сточных вод, в первую очередь, по удалению биогенных элементов – азота и фосфора, что просто не предусматривалось реализованными в них технологиями. В настоящее время необходимо проведение их комплексной реконструкции и модернизации при ограниченных финансовых ресурсах, что требует максимальной детализации и адекватности технических заданий на такие работы. Вместе с тем репрезентативную информацию невозможно

сформировать без качественного импактного мониторинга водоотведения.

В связи с указанным возникает необходимость решения актуальной научно-практической задачи государственного масштаба в области создания решений по контролю водоотведения, которая заключается в разработке методического и программно-аппаратного обеспечения оперативного и распределённого контроля показателей качества сточных вод с минимизацией стоимости систем мониторинга, что позволит адекватно и оперативно оценивать экологическую ситуацию при транспортировке сточных вод населённых пунктов и прогнозировать опасные для биологических очистных сооружений залповые поступления загрязнителей; позволит перейти к этапу цифрового моделирования таких технологических комплексов.

Оценка существующих решений в области контроля и прогнозирования процессов водоотведения

Согласно оценки исследований других авторов основными целями экологического мониторинга водных ресурсов являются [1]: своевременное выявление и прогнозирование развития негативных процессов, влияющих на качество воды в водных объектах и их состояние; разработка и реализация мер по предотвращению негативных последствий этих процессов; оценка эффективности осуществляемых мероприятий по охране водных объектов; информационное обеспечение управления в области использования и охраны водных объектов, в том числе в целях государственного контроля и надзора за использованием и охраной водных объектов.

При этом можно отметить, что развитие экологического мониторинга водных ресурсов и оценки состояния водных экосред, к которым можно отнести и технологические узлы коммунального водоотведения, сопровождается перспективными целями разработки и совершенствования следующих базовых методологических элементов [2]: сбора, хранения, обработки и разноаспектной визуализации натурной информации о состоянии систем и их свойств; оценки интегративных (эмерджентных) свойств и функций объектов; оценки системного статуса водных объектов (гидрологического, гидрохимического, экологического); моделирования процессов, водных экосистем, их ответной реакции на естественные и антропогенные воздействия; системного нормирования нагрузок на водные объекты.

Исследования европейских авторов нацелены главным образом на выполнение Рамочной Директивы по водным ресурсам для

того, чтобы гарантировать населению экологическую безопасность геоэкосистем [3]. Практический интерес представляют работы, нацеленные на экономическое повышение эффективности рационального природопользования, где рассматриваются основы циркулярной экономики [4] и концепт «Умного города» [5].

Для решения перечисленных проблем различными авторами предлагается внедрение в экологическую сферу большого числа известных технологий цифровой экономики: искусственного интеллекта (AI); дистанционного зондирования Земли; беспилотных летательных аппаратов; технологии интернета вещей (IoT); больших данных (Big Data); аналитической обработки данных; цифровых двойников (Digital Twins) (ЦД). Основная сфера применения перечисленных технологий – анализ получаемой в результате экологического мониторинга информации и автоматизация принятия решений в режиме реального времени, прогнозирование опасных природных явлений, выявление и идентификация объектов животного и растительного мира, сбор и передача данных со стационарных и подвижных пунктов наблюдений.

Для достижения максимальной эффективности функционирования спроектированного и введенного в производство экологического производства необходимо также внедрение современных технологий цифрового производства для управления жизненным циклом изделия (PLM – Product Lifecycle Management) с применением автоматизированных систем для проектирования техпроцессов и оформления технологической документации (CAPP – Computer-Aided Process Planning). В таком ключе развивается в Германии программа «Маяки в области искусственного интеллекта в интересах охраны окружающей среды, природы, ресурсов и защиты климата», целью которой является решение задач сокращения выбросов парниковых газов, создания технологий получения возобновляемой энергии и энергосберегающих технологий её хранения и накопления при помощи искусственного интеллекта.

Функциональное моделирование процессов контроля водоотведения с использованием методологии IDEF0

Для формализации задачи водоотведения населённого пункта изначально выполнено их функциональное моделирование с использованием методологии IDEF0. Такой стандарт представляет объект как набор модулей; описание выглядит как «чёрный

ящик» с входами, выходами, управлением и механизмом, который постепенно детализируется до необходимого уровня. Концепт методологии IDEF0 содержится в рекомендациях Р 50.1.028-2001 «Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования».

На основе технологического анализа [6, 7] выбраны следующие категории параметров (согласно терминологии IDEF0) (рис. 1):

– *входящие факторы* (данные поступают от измерительных средств): качество сточных вод на входе в очистные сооружения, расход, состояние насосного оборудования, концентрация сероводорода в помещениях канализационных-насосных станций, затопле-

ние дренажного приямка, потребление электроэнергии, фиксирования доступа в помещения;

– *управляющие факторы*: нормативные требования к качеству СВ перед сбросом в природные водоёмы, технологические требования к СВ, поступающим на БОС, паспортные характеристики оборудования и узлов системы водоотведения;

– *механизмы*: электротехническое оборудование водоотведения;

– *результаты*: логический прогноз показателей качества сточных вод, поступающих на очистные сооружения; состояние системы водоотведения населённого пункта.

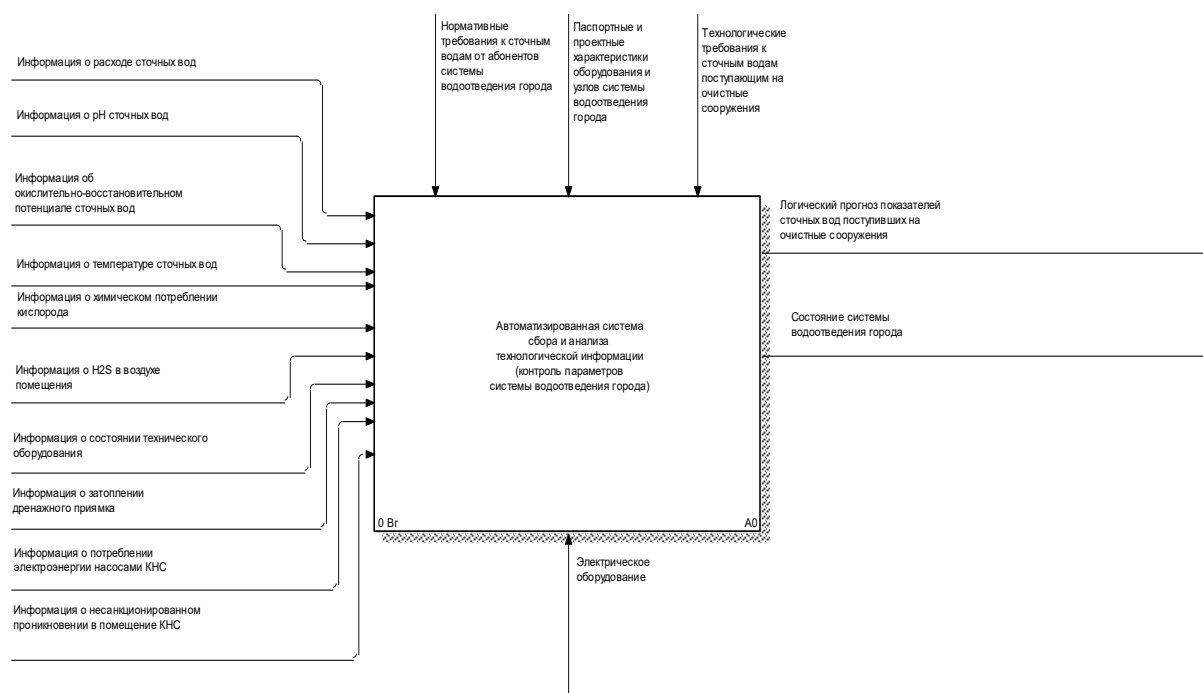


Рисунок 1 – Контекстная диаграмма контроля параметров системы водоотведения населённого пункта

Моделирование процессов контроля водоотведения с использованием нотаций UML

Решение задачи статического концептуального моделирования параметров водоотведения – определение содержательной составляющей внутренние системных связей, что позволит провести параметрический синтез соответствующей системы анализа и прогнозирования. Для этого целесообразно использовать методологию UML (Unified Modeling Language) – унифицированный язык моделирования, который не зависит от технологий и используется для моделирования систем, в том числе многопараметрических, с

помощью объектно-ориентированных парадигм. Процесс такого объектно-ориентированного моделирования водоотведения не будет линейным и последовательным, а итеративным и параллельным, обеспечивая адаптивные корректировки параметров модели путем реализации производственных циклов [8 – 10].

Устанавливаем, что в системе имеются следующие актёры-люди: инженерно-технологические работники (ИТР) Водоканала; дежурный оператор SCADA ОС – он же выполняет функционал дежурного оператора «Автоматизированной распределённой Web-системы оперативного контроля параметров водоотведения города». Кроме них есть актёры, соответствующие внешним системам: SCADA

ОС; агрегированы внешние системы более высокой иерархии по линии МЧС, санэпид службы, экологии. Для упрощения структуры концептуальной модели примем, что импактные измерительные блоки автоматического сбора информации и локальные контроллеры укрупнены в соответствующие единые территориальные элементы.

Конкретные варианты использования отражаются в основном и альтернативном потоках событий, они описывают, что должно

происходить во время выполнения заложенного алгоритма. Первичный и альтернативный потоки событий содержат: описание того, каким образом запускаются варианты использования; различные пути выполнения вариантов использования; отклонение от основного потока событий; потоки ошибок; описание каким образом завершается вариант использования.

Диаграмма вариантов использования представлена на рис. 2.

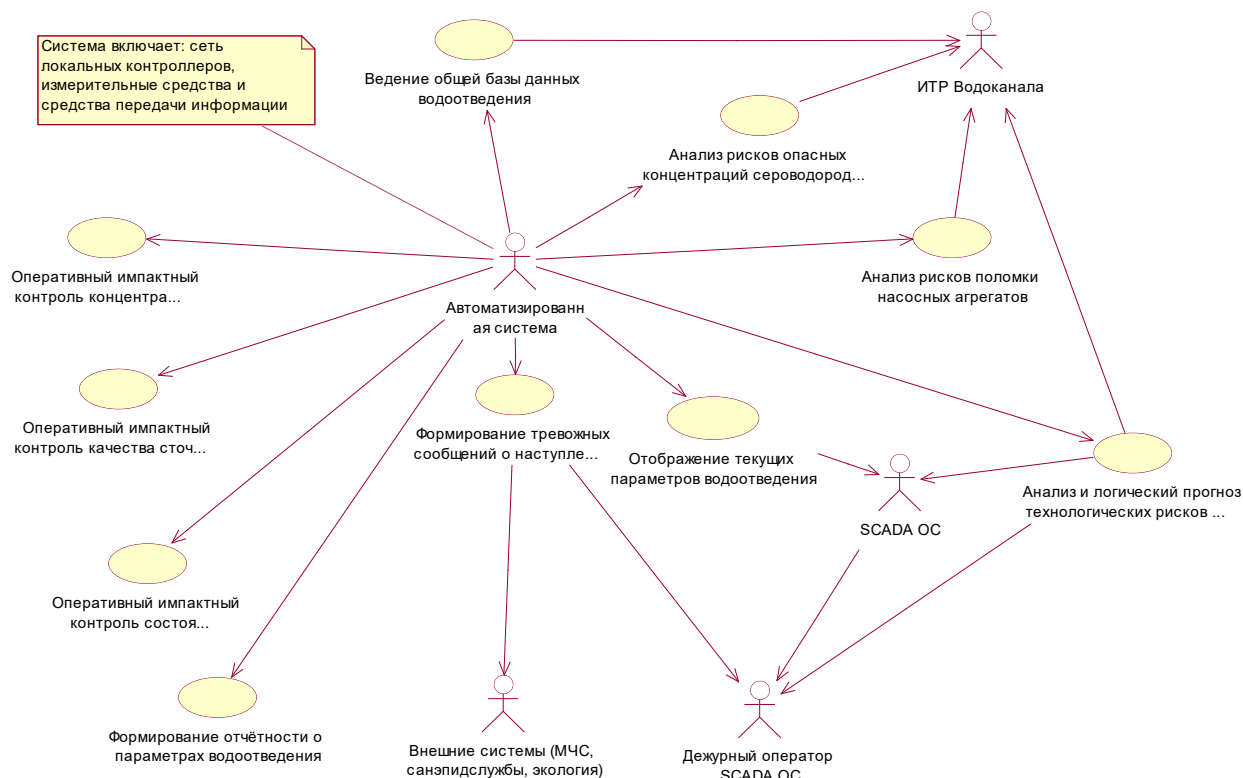


Рисунок 2 – Диаграмма вариантов использования «Автоматизированной распределённой Web-системы оперативного контроля параметров водоотведения города» (согласно нотации UML)

Поскольку «Сеть локальных контроллеров по месту» и «Web-системы контроля параметров водоотведения» концептуально состоят и из серверного оборудования, то соответствующие локальные базы данных связаны с ними с помощью иерархии связи обобщения/специализации. При этом с технологической зрения класс «Сеть локальных контроллеров по месту» агрегирует в себя классы «Измерительные импактные блоки» (показателей сточных вод, концентрации сероводорода в воздухе, состояния оборудования).

Между классами «Сеть локальных контроллеров по месту», «Средства передачи данных от распределённых локальных контроллеров», «Web-системы контроля параметров водоотведения», «Интеллектуально-вычислительный модуль» и «Средства передачи

информации от Web-системы внешним пользователям и системам» имеется двунаправленная ассоциация. Однонаправленная ассоциация связывает классы «Средства передачи информации от Web-системы внешним пользователям и системам» и «Средства передачи тревожных сообщений о чрезвычайных ситуациях» и внешних актёров: «Инженерно-технологические работники (ИТР Водоканала)», «Дежурный оператор SCADA ОС», «SCADA ОС», внешние системы более высокой иерархии по линии МЧС, санэпид службы, экологии.

Отдельно необходимо отметить, что классы «ИТР Водоканала» (в большей степени) и «Дежурный оператор SCADA ОС» концептуально определяют работу класса «Web-системы контроля параметров водоотведения» и при этом пользуется результатами его работы.

Поэтому связь между ними, через класс «Средства передачи информации от Web-системы внешним пользователям и системам», реализуется с помощью двунаправленной ассоциации. Структурная локализация технических средств Автоматизированной распределённой Web-системы оперативного контроля параметров водоотведения города Пинска представлена на диаграмме размещения (развёртывания), рис. 3. Диаграмма размещения обычно используется для

визуализации аппаратных процессоров/узлов/устройств системы, каналов связи между ними и размещения программных файлов на этом аппаратном обеспечении. При этом на рисунке 3 «Сеть локальных контроллеров» и «Сервер Web-системы контроля параметров водоотведения» являются процессными объектами (в терминах UML), инициируя выполнение соответствующих операций; остальные элементы – средствами, выполняющими поставленные задачи.

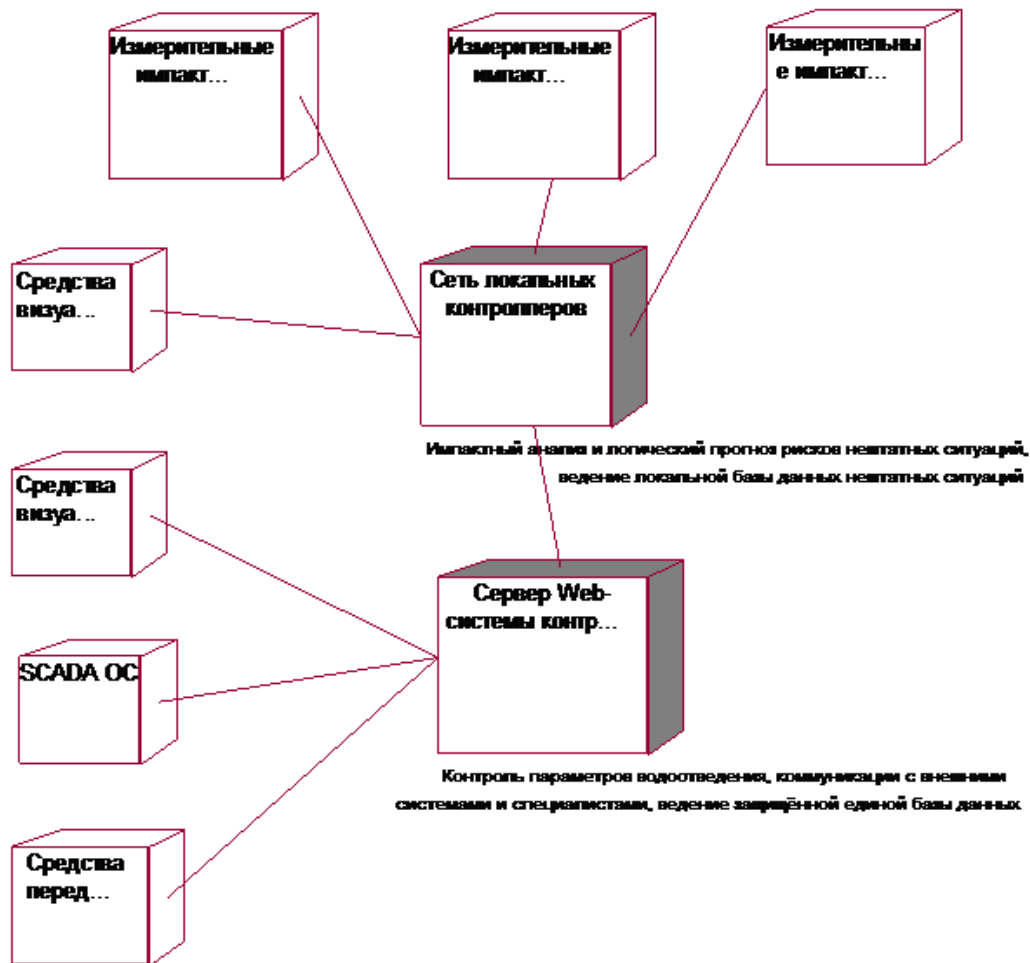


Рисунок 3 – Диаграмма размещения технических средств «Автоматизированной распределённой Web-системы оперативного контроля параметров водоотведения» в виде диаграммы классов (в нотациях UML)

Аспекты цифрового моделирования контроля процессов водоотведения

Производственная структура цифрового двойника описана ISO 23247; в ГОСТ Р 57700.37-2021 содержится определение понятия «цифровой двойник изделия», под которым понимается «система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями». Вместе с тем активное внедрение информатизации породило новый феномен –

Data Driven City (город, управляемый данными) [11] и близкий ему термин Smart City. Умный город можно определить как стратегический подход к интеграции данных и цифровых технологий для обеспечения устойчивости, благосостояния граждан и экономического развития городской среды.

Обобщая результаты функционально-статического моделирования и заключения других авторов, предлагается итерационный жизненный цикл цифровой модели контроля водоотведения (рис. 4).

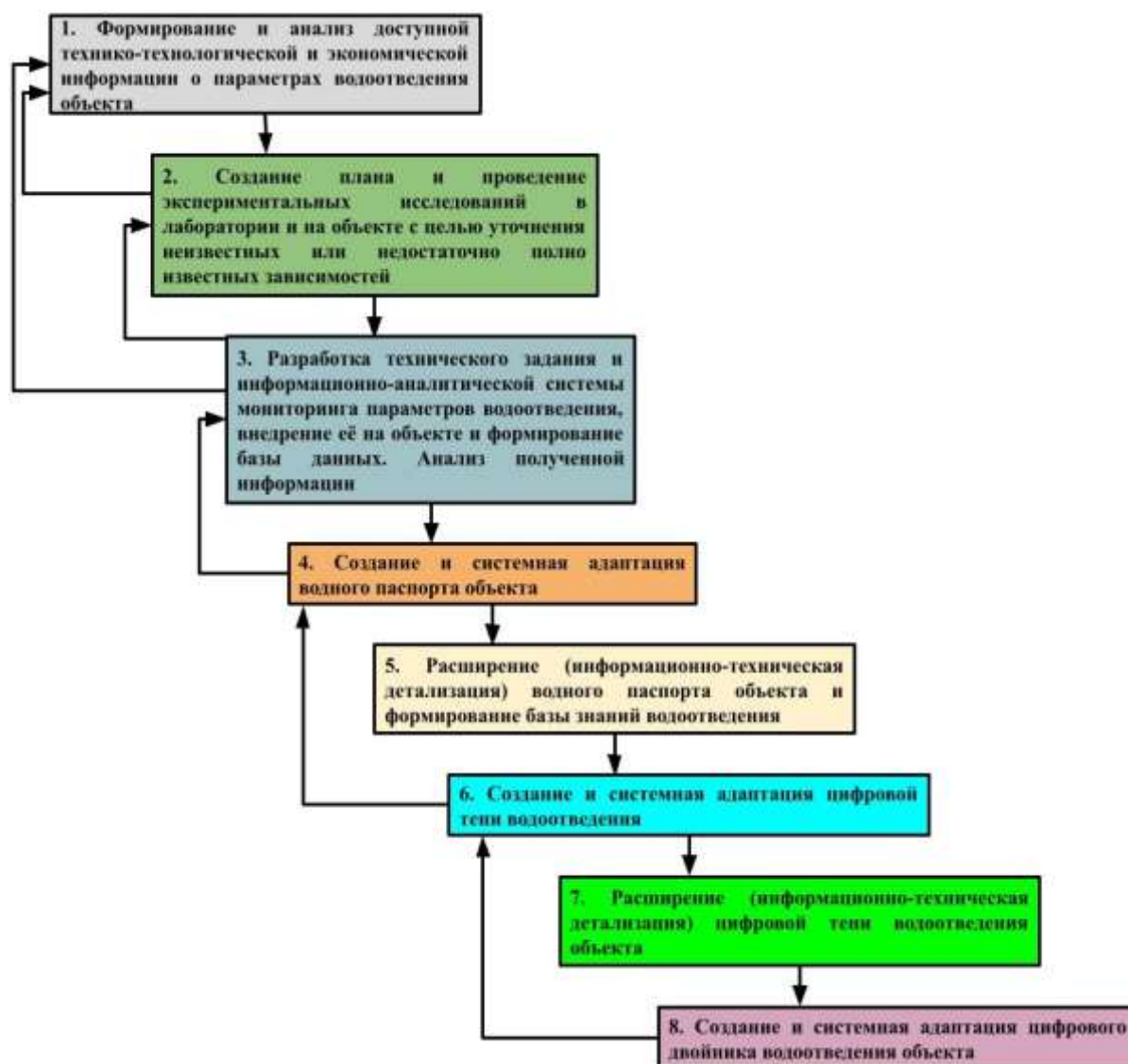


Рисунок 4 – Схема жизненного цикл цифровой модели контроля водоотведения (на основе итерационного подхода)

Первый этап включает систематизацию и анализ всей доступной информации (технико-технологической и экономической). Как правило, её критически недостаточно для формирования даже экспертных заключений.

На втором шаге происходит фактическое планирования действий для накопления необходимой информации, в том числе с использованием исследований в профильных лабораториях (например, по оценке влияния потенциальных токсикантов СВ на активный ил ОС).

Третий этап выполняет задачу информатизации контроля водоотведения – обеспечивается (начинается) накопление данных и их анализ.

Шаг четвертый подразумевает синтез и постоянную адаптацию водного паспорта объекта – с использованием уже работающей информационно-аналитической системы.

Этапы пять и шесть переводят систему контроля уже на уровень «цифрового моделирования» – создаётся цифровая тень водоотведения, поддерживающая аналитику и прогноз в ранее зарегистрированных границах значений контролируемых параметров, но на уже основе интеллектуального математического аппарата.

Этапы семь и восемь трансформируют цифровое решение на более высокий иерархический уровень цифрового двойника.

Функционирует на объекте уже ЦД, который итерационно, при производственной необходимости (несоответствии качества работы заданным требованиям), должен «опуститься» на более низкий уровень иерархии для улучшения (адаптации к новым внешним условиям) своего математико-технологического базиса.

Обобщенная схема жизненного цикла (рис.4) позволяет выделить четыре уровня моделирования контроля процессов водоотведения:

1. Модель первого уровня (комплекс, включающий: упрощённые системные и физические модели) применяется для выбора основной аппаратной архитектуры цифрового двойника – этапы 1 и 2.

2. Модель второго уровня (комплекс, включающий: базовые системные и информационно-логические модели) применяется для отработки логических законов и/или алгоритмов контроля водоотведения – этапы 2 и 3.

3. Модель третьего уровня (комплекс, включающий: информационно-логические и математические (количественные) модели) применяется для системного анализа и количественного моделирования процессов водоотведения – этапы 3, 4.

Модель четвёртого уровня (комплекс, включающий: информационно-логические, математические (количественные) и интеллектуальные модели) применяется для цифрового моделирования и прогнозирования процессов водоотведения – этапы 5, 6, 7 и 8.

Заключение

На современном уровне развития прогнозирования процессов водоотведения актуальным является решения научно-практической задачи государственного масштаба в области цифрового моделирования, которая заключается в разработке методического и программно-аппаратного обеспечений оперативного и распределённого контроля показателей использования водных ресурсов с внедрением таких цифровых комплексов в водопроводно-канализационных хозяйствах.

Созданная на основе функционального (методология IDEF0) и статического (нотации UML) моделирования схема итерационного жизненного цикла цифрового двойника процессов контроля водоотведения включает восемь этапов и четыре уровня моделей, при этом в случае производственной необходимости (несоответствии качества работы заданным требованиям), цифровой двойник должен «опуститься» на более низкий уровень иерархии для улучшения (адаптации к новым внешним условиям) своего математико-технологического базиса.

Дальнейшие исследования целесообразно сфокусировать на декомпозицию созданных этапов цифрового моделирования процессов водоотведения.

Литература

1. Архипов, Д. Э. Развитие мониторинга водных объектов на основе интегральной оценки экологического статуса и моделирования экологических функций / Д. Э. Архипов, К. Е. Едемский, С. И. Кожевникова, В. В. Дмитриев // *European Journal of Natural History*. – 2022. – № 2. – С. 31-37
2. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal L 327, 22/12/2000, 73 p.
3. Eugenio Molina-Navarro, Pedro Segurado, Paulo Branco, Carina Almeida, Hans E. Andersen Predicting the ecological status of rivers and streams under different climatic and socioeconomic scenarios using Bayesian Belief Networks. *Limnologica* 80 (2020) 125742 <https://doi.org/10.1016/j.limno.2019.125742>.
4. Hering, D. Managing aquatic ecosystems and water resources under multiple stress — an introduction to the MARS project / D. Hering, L. Carvalho, C. Argillier, M. Beklioglu, A. Borja, A.C. Cardoso, et al. // *Sci. Total Environ.* 503–504, 2015. - P. 10–21.
5. Алексеев, Е. В. Основы моделирования систем водоснабжения и водоотведения : учебное пособие / Е. В. Алексеев, В. Б. Викулина, П. Д. Викулин. - Москва : Издательство МИСИ - МГСУ, 2017. - 126 с. - ISBN 978-5-7264-1641-0. - Текст: электронный // ЭБС Консультант студента: [сайт]. - URL:<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785726416410.html> (дата обращения: 23.09.2022).
6. Штепа, В. Н. Концептуальные основы энергоэффективной системы управления комбинированными системами водоочистки / В. Н. Штепа // *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика: научно-технический журнал*. – 2016. – № 5. – С. 479 – 487.
7. Штепа, В. Н. Интеллектуальная система анализа и прогноза экологической безопасности биологических сооружений очистки сточных вод / В. Н. Штепа, Н. Ю. Золотых // *Первая выставка-форум IT-академграда «Искусственный интеллект в Беларуси»: сборник докладов, Минск, 13-14 октября 2022 г.* / Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси. - Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2022. - С. 41-45.
8. Обоснование структуры и состава систем водоочистки на основе оценки уровня автоматизации технологических процессов / В. Н. Штепа [и др.] // *Вестник Брестского государственного технического университета*. - 2020. - № 4. - С. 17-22.

9. Штепа, В. Н. Структура и функционал интеллектуальной системы поддержки принятия решений в водоотведении / В.Н. Штепа // Информатика и кибернетика: научный журнал. - 2022. - №3 (29). - С.51-57.

10. Штепа, В.Н. Обоснование и схемы использования ранжирующих измерительных систем экологического мониторинга и интеллектуального анализа режимов водоотведения / В.Н. Штепа, Н.Ю. Золотых, С.Ю. Киреев // Вестник Полоцкого

государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки: научный журнал. - 2023. - № 1. - С. 94-103.

11. Иванов С. А. Концепция построения цифрового двойника города / С. А. Иванов, К. Ю. Никольская, Г. И. Радченко, Л. Б. Соколинский, М. Л. Цымблер // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика, 2020. - Т. 9. - № 4. - С. 5–23. DOI: 10.14529/cmse200401

Штепа В.Н. Функционально-статический анализ системы контроля водоотведения и оценка подходов к её цифровому моделированию. Оценены актуальная ситуация экологической безопасности водоотведения населённых пунктов и разработки других авторов в данной проблемной области, исходя из результатов анализа обосновано важность построения информационной системы оперативного контроля параметров канализования сточных вод. Проведены функциональное (методология IDEF0) и статическое (нотация UML) моделирования процесса контроля параметров водоотведения, позволившие сформировать структуры специализированных программно-аппаратных решений. Создана схема итерационного жизненного цикла цифровой модели (цифрового двойника) управления водными ресурсами объектов водопользования.

Ключевые слова: водоотведение, информационная система, экологическая безопасность, цифровое моделирование, цифровой двойник, цифровая тень.

Shtepa V.N. Functional-static analysis of the wastewater control system and assessment of approaches to its digital modeling. The current situation environmental safety wastewater disposal in populated areas and the developments of other authors in this problem area are assessed; based on the results of the analysis, the importance building the information system for operational monitoring wastewater sewerage parameters is substantiated. Functional (IDEF0 methodology) and static (UML notation) modeling the process monitoring wastewater disposal parameters was carried out, which made it possible to formulate the structures of the specialized software and hardware solutions. The diagram iterative life cycle of the digital model (digital twin) for managing water resources of the water use facilities has been created.

Keywords: water disposal, information system, environmental safety, digital modeling, digital twin, digital shadow.

Статья поступила в редакцию 12.10.2023
Рекомендована к публикации профессором Мальчевой Р. В.