

Обоснование мониторинга системы водоотведения и оценка технологических рисков

В. Н. Штепа¹, С. В. Степанов², П. П. Авдеенков³, А. В. Дубина⁴



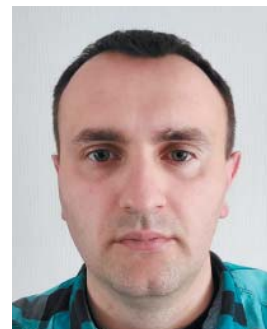
В. Н. Штепа



С. В. Степанов



П. П. Авдеенков



А. В. Дубина

¹ Штепа Владимир Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой промышленной экологии, Белорусский государственный технологический университет 220006, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, e-mail: tppoless@gmail.com

² Степанов Сергей Валериевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Академия строительства и архитектуры, Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, Молодогвардейская ул., 244, e-mail: stepanovsv3@yandex.ru

³ Авдеенков Павел Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Академия строительства и архитектуры, Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, Молодогвардейская ул., 244, e-mail: avdeenkovpp@mail.ru

⁴ Дубина Александр Валентинович, старший преподаватель кафедры промышленной экологии, Белорусский государственный технологический университет 220006, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, e-mail: dubina@belstu.by

Для цитирования: Штепа В. Н., Степанов С. В., Авдеенков П. П., Дубина А. В. Обоснование мониторинга системы водоотведения и оценка технологических рисков // Водоснабжение и санитарная техника. 2025. № 10. С. 38–47. DOI: 10.35776/VST.2025.10.05.

На основе системного анализа рассмотрен технологический комплекс транспортировки и очистки городских сточных вод с точки зрения использования в организациях водопроводно-канализационного хозяйства объектового мониторинга. Определено, что данный комплекс является распределенной системой. Выявлен низкий уровень наблюдаемости процессов транспортировки сточных вод, что характеризует систему водоотведения как слабоуправляемый объект. В результате физического моделирования симитированы усредненные значения ряда показателей качества городских сточных вод при условии различных режимов отведения бытовыми абонентами, предприятием по переработке молока и хлопчатобумажным производством. При помощи программного обеспечения «ПОТЕНЦИАЛ» смоделирована работа городских

канализационных очистных сооружений. Показано, что в достаточно широком диапазоне изменения расходов и состава производственных сточных вод по содержанию органических веществ, аммония и фосфатов критическое влияние на результаты очистки отсутствовало, а резкое изменение pH исходных сточных вод способно нарушить процесс биологической очистки. На основе предиктивного подхода предложена обоснованная схема и последовательность управления системой водоотведения как единым технологическим комплексом, что значительно снижает риски возникновения техногенных чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: городские сточные воды, водоотведение, биологическая очистка, физическое и математическое моделирование, мониторинг, технологические риски.

WASTEWATER DISPOSAL SYSTEMS

Substantiation of monitoring a wastewater disposal system and technological risk estimation

V. N. Shtepa¹, S. V. Stepanov², P. P. Avdeenkov³, A. V. Dubina⁴

¹ Shtepa Vladimir, Doctor of Engineering, Head of Department of Industrial Ecology, Belarusian State Technological University 13a Sverdlova St., Minsk, 220006, Republic of Belarus, e-mail: tppoless@gmail.com

² Stepanov Sergei, Doctor of Engineering, Professor, Water Supply and Wastewater Disposal Department, Academy of Civil Engineering and Architecture, Samara State Technical University
244 Molodogvardeiskaia St., Samara, 443100, Russian Federation, e-mail: stepanovsv3@yandex.ru

³ Avdeenkov Pavel, Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Water Supply and Wastewater Disposal Department, Academy of Civil Engineering and Architecture, Samara State Technical University
244 Molodogvardeiskaia St., Samara, 443100, Russian Federation, e-mail: avdeenkovpp@mail.ru

⁴ Dubina Aleksandr, Senior Lecturer, Department of Industrial Ecology, Belarusian State Technological University
13a Sverdlova St., Minsk, 220006, Republic of Belarus, e-mail: dubina@belstu.by

For citation: Shtepa V. N., Stepanov S. V., Avdeenkov P. P., Dubina A. V. Substantiation of monitoring a wastewater disposal system and technological risk estimation. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*, 2025, no. 10, pp. 38–47. DOI: 10.35776/VST.2025.10.05. (In Russian).

Based on the system analysis a technological complex for the municipal wastewater transportation and treatment was examined in terms of using facility-based monitoring at the water and wastewater utilities. The given complex is specified as a distributed system. Low observability of wastewater transport processes was identified, characterizing the wastewater disposal system as a poorly-governed facility. Following physical modeling average values for a range of municipal wastewater quality indicators were simulated under various discharge conditions for residential customers, a dairy, and a cotton mill. The operation of municipal wastewater treatment facilities was simulated using POTENTIAL software. It was shown that, over a fairly wide range of variations in the flow rate and composition of industrial wastewater in terms of organic matter, ammonium, and phosphate concentration, no critical impact on the treatment level was revealed, while a sharp change in pH of the raw wastewater could disturb the biological treatment process. Based on a predictive approach, a valid scheme and control sequence for the wastewater disposal system as a single technological complex was proposed, that reduces significantly the risk of man-caused emergency situations.

Key words: municipal wastewater, wastewater disposal, biological treatment, physical and mathematical simulation, monitoring, technological risks.

Введение

На сегодняшний день в Российской Федерации и Республике Беларусь уделяется большое внимание очистке сточных вод. В рамках Национальных проектов РФ «Экология» и «Экологическое благополучие» реализуются федеральные проекты «Оздоровление Волги» и «Вода России», выделяется финансирование на реконструкцию и новое строительство канализационных очистных сооружений (КОС). В Беларуси утверждена «Национальная стратегия управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года», в состав которой также входит реконструкция и новое строительство КОС.

Вместе с тем результаты практической реализации запланированных государственных мероприятий свидетельствуют о значительных проблемах в достижении поставленных целей. В РФ имеет место Инцидент № 55 «Очистные сооружения», созданный по результатам проверки парламентского контроля из-за недостижения поставленных целей проекта. Следует отметить, что оценка результатов не была бы столь негативной, если принять, что загрязнения — это не кубометры, а килограммы. При этом опасность загрязнений разная, поэтому надо складывать не массы загрязняющих веществ, а отношения масс к ПДК. Оценивать эффективность работы коммунальных очистных сооружений можно только по тем веществам, на которые они рассчитаны и удалением которых можно управлять — по семи технологическим показателям. Такой механизм

закреплен в Справочнике по наилучшим доступным технологиям ИТС 10-2019 [1].

Технологическая ситуация на муниципальных КОС осложняется присутствием в сточных водах таких загрязнений, на очистку от которых сооружения не рассчитаны и рассчитаны быть не могут. Такими веществами, например, являются тяжелые металлы, поступающие на КОС со сточными водами промышленных предприятий или с водопроводной водой. Согласно ИТС 10-2019, п. 3.1, нормирование большинства техногенных веществ в сбросах городских сточных вод бессмысленно, так как на сооружениях биологической очистки и доочистки невозможно целенаправленно управлять их удалением.

Для получения эффекта удаления, на который способна биологическая очистка на каждом конкретном объекте, достаточно поддерживать эти сооружения в нормальном работоспособном состоянии. При этом, в отсутствие эффективных технологий локальной очистки производственных сточных вод и утилизации их осадков, промышленные предприятия могут отводить в системы централизованной канализации высококонцентрированные водные растворы, на очистку которых муниципальные КОС не рассчитаны. Это приведет к превышению допустимых концентраций загрязнений в очищенных сточных водах, а возможно, и к длительному нарушению технологического процесса на сооружениях биологической очистки. Например, негативное влияние того или иного металла на

биоценоз активного ила зависит от концентрации металла, дозы ила, жесткости и щелочности очищаемой воды, pH, температуры, присутствия других токсикантов, в том числе металлов [2].

Актуальность координации функционирования организаций водопроводно-канализационного хозяйства и юридических лиц в сегменте водоотведения отмечена в заявлении министра природных ресурсов и экологии РФ А. А. Козлова: «Исключить попадание специфических промышленных загрязнений в сточные воды, попадающие на коммунальные очистные сооружения»¹. В рамках такого поручения экспертная группа Минприроды РФ определила цель: «... важно наладить взаимодействие с абонентами, чтобы предотвратить несанкционированные подключения и отрегулировать действующие, которые завышают установленные показатели»².

Вполне очевидно, что система работы ВКХ нуждается в больших изменениях. Решение организационных противоречий, в первую очередь, находится в плоскости научно-прикладных задач – обоснованного повышения наблюдаемости и прогнозируемости процессов водоотведения как единого технологического комплекса, включающего абонентов, локальные очистные сооружения (ЛОС) промышленных предприятий, водоотводящую сеть с ее подсистемами, муниципальные КОС, выпуск очищенных сточных вод и водный объект – приемник сточных вод.

Цель настоящей работы – обоснование создания системы мониторинга работы системы канализации, включающей контроль и прогноз параметров функционирования водоотводящих сетей, канализационных насосных станций и

¹ Российская ассоциация водоснабжения и водоотведения: [электронный ресурс]. <https://raww.ru/pressroom/association-news/2472-glava-minprirodyi-rossii-aleksandr-kozlov-prizval-isklyuchit-popadanie-speczificheskix-promyshlennyix-zagryaznenij-v-stochnyie-vodyi,-postupayushhie-na-kommunalnyie-ochistnyie-sooruzheniya.html?ysclid=mbgalfx14k120514829/>.

² Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации: [электронный ресурс]. https://www.mnr.gov.ru/press/news/otsenka_fakticheskogo_sostoyaniya_ochistnykh_sooruzheniy_v_saratovskoy_oblasti_problemy_i_puti_reshe/?ysclid=mc2wqcscho3932670611/.

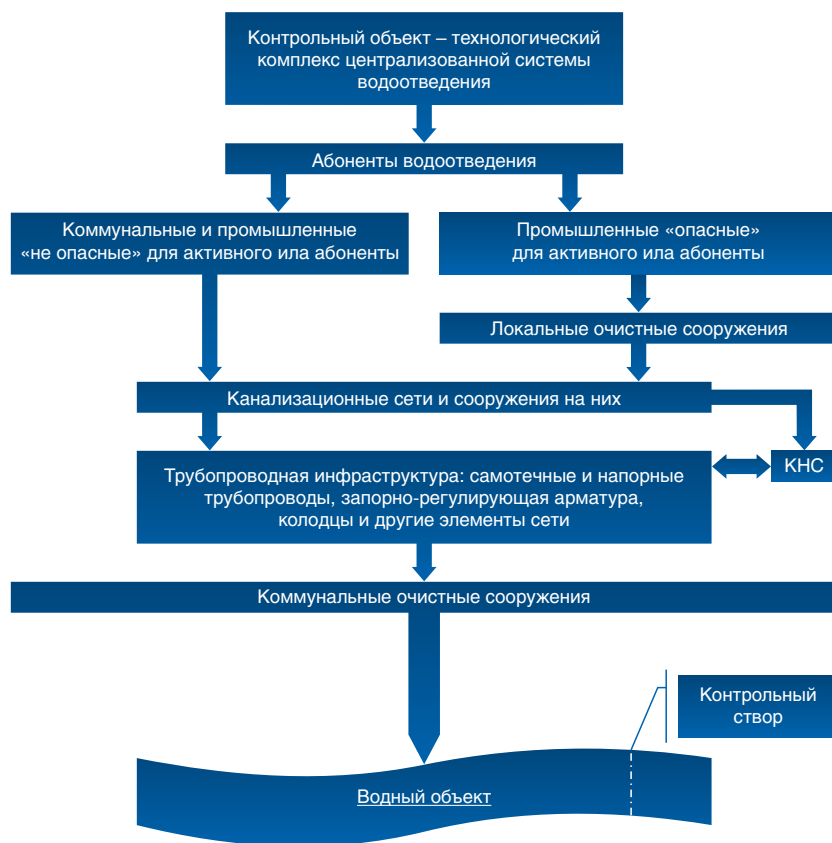


Рис. 1. Блок-схема декомпозиции технологического комплекса транспортировки и очистки городских сточных вод

очистных сооружений, передачу предупреждающих сигналов о возможных технологических и экологических рисках, а также превышениях установленных нормативов качества отводимых и очищенных сточных вод.

Декомпозиция и мониторинг технологического комплекса транспортировки и очистки городских сточных вод

В рамках системной оценки фактической ситуации водоотведения городских сточных вод как объекта мониторинга и потенциального управления выполнена декомпозиция технологического комплекса транспортировки и очистки сточных вод на три основных блока (рис. 1):

абоненты, к которым относятся коммунальные и промышленные «неопасные» абоненты, сточные воды которых **не содержат** загрязняющих веществ, способных оказывать негативное влияние на процессы очистки; промышленные «опасные» абоненты, сточные воды которых **содержат** загрязняющие вещества, способные оказывать негативное влияние на процессы очистки, в первую очередь на биоценоз активного ила;

Таблица 1

Контролируемый элемент	Оперативный контроль	Периодический контроль	Вычисляемые параметры
Локальные очистные сооружения промышленных абонентов, «опасных» для активного ила			
Состав сточных вод до и после очистки	Расход сточных вод, pH, электропроводность, мутность, температура	Взвешенные вещества, БПК ₅ , ХПК, NH ₄ , NO ₂ , NO ₃ , PO ₄ , специфические загрязнения	Эффективность по ступеням очистки
Технологический режим	В соответствии с проектом ЛОС	В соответствии с технологическим регламентом ЛОС	Расход реагентов, электроэнергии, показатели в соответствии с технологическим регламентом ЛОС
Состояние оборудования ЛОС	Сила тока, напряжение, температура обмотки двигателей основного технологического оборудования	Контроль состояния основного технологического оборудования, ЗРА, электрооборудования, КИП	—
Самотечные и напорные трубопроводы и сооружения на них			
Состояние трубопроводной инфраструктуры	—	Технический осмотр, видеосъемка при наличии возможности	Сбор, хранение и систематизация данных по авариям, показатели надежности
Канализационные насосные станции			
Состояние оборудования трубопроводной и регулирующей инфраструктуры	Расходы сточных вод и электроэнергии, давление, вибрация, сила тока, напряжение, температура обмотки двигателей, уровни воды, концентрация газов	Контроль состояния насосов, решеток, ЗРА, электрооборудования, КИП	Суммарный расход сточных вод и электроэнергии, КПД насосов
Городские канализационные очистные сооружения			
Состав сточных вод (вход, выход, по ступеням очистки)	Мутность, ХПК, аммоний, нитраты, нитриты, фосфаты, pH, температура	Взвешенные вещества, БПК ₅ , ХПК, аммоний, нитраты, нитриты, общий азот, фосфаты, общий фосфор	Эффективность по ступеням очистки, соотношение БПК/азот и БПК/фосфор по ступеням очистки
Технологический режим	Расход сточных вод и других технологических потоков, КРК, ОВП, уровень ила во вторичных отстойниках	Доза ила, иловый индекс, видовой состав активного ила, зольность и влажность всех видов осадков	Нагрузка на сооружения, эффективность очистки, аэробный возраст активного ила, расход реагентов и электроэнергии
Состояние оборудования	Сила тока, напряжение, температура обмотки двигателей технологического оборудования	Контроль состояния технологического оборудования, ЗРА, электрооборудования, КИП	—

канализационные сети и сооружения на них; городские канализационные очистные сооружения, состоящие из блоков механической и биологической очистки, доочистки (при необходимости), обеззараживания, выпуска очищенных сточных вод и обработки образующихся осадков.

Анализ рис. 1 показывает, что полученная декомпозиция однозначно характеризует технологический комплекс транспортировки и очистки сточных вод как распределенную систему, так как ее элементы выполняют одну цель, но существуют во многом независимо друг от друга. В табл. 1, с учетом СП 517.1325800.2022 с Изменением № 1, представлены предлагаемые решения по мониторингу в технологическом комплексе

транспортировки и очистки городских сточных вод.

Анализ систематизированных данных, представленных в табл. 1, и фактической ситуации относительно временных и инструментальных характеристик применяемого организациями ВКХ мониторинга позволяет сформировать следующие выводы:

единая информационная экосреда в сфере ВКХ отсутствует;

наибольшая наблюдаемость реализована на муниципальных КОС и ЛОС промышленных предприятий;

процессы, происходящие на водоотводящей сети, фактически не наблюдаемы, за исключением отдельных процессов, локализованных на КНС.

Отметим, что при формировании табл. 1 авторы руководствовались тем, что создание системы распределенного мониторинга системы ВКХ города, включая абонентов, позволит получить единую, открытую для всех ее участников информационную среду.

Выводы, полученные по табл. 1, подтверждаются данные работы [3] о том, что для повышения комплексного уровня автоматизации наибольшее внимание необходимо уделить импактному (местному) мониторингу в доступных для этого местах; вторым по значимости для улучшения наблюдаемости является прогноз параметров на основе информационно-аналитической обработки данных. Так, интеллектуальная обработка данных о силе тока и температуре обмотки двигателей, вибрации насосов может заблаговременно предупредить о предаварийном состоянии оборудования, а изменение давления и подачи насосов — об аварии на напорных трубопроводах. В то же время импактный мониторинг требует разработки значительного количества абсолютно новых измерительных средств, способных работать энергонезависимо в режиме реального времени в агрессивных условиях, что, безусловно, выходит за рамки прикладных задач цифровизации водоотведения, но является чрезвычайно важным.

Таким образом, существует актуальная потребность в создании методического и информационно-коммуникационного обеспечения цифровой платформы управления водоотведением коммунальных и промышленных объектов, которая бы реализовывала функцию «Мониторинг и прогноз параметров водоотведения», прежде всего на основе ограничивающих критериев, базирующихся на технологических возможностях КОС и доступных средствах моделирования соответствующих процессов.

Сточные воды промышленных предприятий потенциально могут содержать загрязнения, негативно влияющие на биоценоз активного ила. Причем оказываемое влияние может выражаться как в снижении эффективности очистки за счет снижения удельных скоростей окисления, так и гибели биоценоза активного ила. Этому необходимо превентивно противодействовать за счет строительства ЛОС, не допуская объединения производственных сточных вод, взаимодействие которых может привести к образованию эмульсий, ядовитых или взрывоопасных газов, а также большого количества нерастворенных веществ (например, сточных вод, содержащих соли кальция или магния и щелочные растворы, соду и кислоту, хлор и фенолы и т. д.) [4].

Задача ЛОС состоит в выполнении требований, установленных для приема промышленных сточных вод в сети коммунальной канализации, что обеспечит нормальную работу канализационных сетей и предотвратит превышение концентраций загрязнений в очищенных сточных водах на городских КОС. Для прогнозирования результатов смешения сточных вод разных абонентов канализационной сети и определения их влияния на работу городских очистных сооружений могут помочь программы математического моделирования, которых на данный момент не существует, что критически сдерживает повышение наблюдаемости процессов системы водоотведения.

Методика эксперимента

Для оценки влияния производственных сточных вод на концентрацию загрязнений в сточных водах, поступающих на городские очистные сооружения, было проведено физическое моделирование образующейся смеси. Для этого в одном из городов Беларуси в течение трех лет отбирали пробы сточных вод в контрольном колодце двух промышленных предприятий и в колодце городской канализационной сети, в котором производственные сточные воды отсутствовали.

Для определения значений pH использовался потенциометрический метод, который основан на измерении зависящей от активности ионов водорода в анализируемой пробе воды разности потенциалов селективного стеклянного электрода и хлорсеребряного электрода сравнения. Суммарная погрешность метода составляет 0,1 единицы pH.

Для определения значений ХПК применяли титриметрический метод (этот экспресс-метод определения ХПК используется при анализе сильнозагрязненных природных и сточных вод), основанный на измерении необходимого для полного реагирования с определяемым веществом объема раствора реактива точной концентрации.

Для определения концентрации $N-NH_4$ использовался потенциометрический метод, который основан на измерении электрохимического потенциала индикаторного электрода, погруженного в исследуемый раствор, относительно электрода сравнения, потенциал которого постоянен и не зависит от концентрации определяемого иона.

Для определения концентрации $P-PO_4$ использовали спектрометрический метод анализа, который основан на реакции ионов ортофос-

Таблица 2

Показатель	Хлопчатобумажное производство	Молокозавод	Хозяйственно-бытовые абоненты
pH	10,8/5,8	9,5/4,2	7
ХПК, мг/л	823/153	1562/137	592
N–NH ₄ , мг/л	9,3/1,6	27,9/2,2	35,2
P–PO ₄ , мг/л	2,6/0,07	0,7/0,13	4,1
Примечание: в числителе — максимальное значение, в знаменателе — минимальное.			

Таблица 3

Режим водоотведения (определяет соотношение сточных вод от различных абонентов)	Значения		
	хлопчатобумажное производство	молокозавод	хозяйственно-бытовые абоненты
Ночной	Максимальные	Максимальные	Усредненные
Ночной	Максимальные	Минимальные	Усредненные
Ночной	Минимальные	Минимальные	Усредненные
Дневной	Максимальные	Максимальные	Усредненные
Дневной	Максимальные	Минимальные	Усредненные
Дневной	Минимальные	Минимальные	Усредненные

фата в кислой среде с раствором, содержащим молибдат аммония и ионы сурьмы, в результате чего образуется комплекс фосфомолибдата сурьмы.

Количество отобранных проб составило: предприятие, выпускающее хлопчатобумажные ткани, — 21, молокозавод — 17, хозяйственно-бытовые сточные воды — 23. В табл. 2 представлены результаты аналитического контроля. При этом минимальные и максимальные значения для производственных сточных вод рассчитывали как среднее арифметическое из трех наименьших и трех наибольших концентраций в соответствующем ряду данных (приблизительно 15%-й диапазон). Для хозяйственно-бытовых сточных вод приведены средние значения.

Доли объемов сточных вод были приняты в ночной период (с 20:00 до 8:00): хлопчатобумажное производство — 50%, молокозавод — 5%, жители — 45%; в дневной период (с 8:00 до 20:00): хлопчатобумажное производство — 10%, молокозавод — 1%, жители — 89%. С целью охвата информационного пространства и отслеживания влияния различных абонентов на итоговый качественный состав сточных вод была создана матрица экспериментальных исследований, представленная в табл. 3.

Физическое моделирование в лабораторных условиях осуществлялось исходя из необходимости достижения значений табл. 2 и реализации плана-схемы табл. 3, при обязательном условии

Таблица 4

Показатель	Номер опыта					
	1	2	3	4	5	6
pH	7,9	7,6	6,9	7,1	7,1	7
ХПК, мг/л	651,8	605,3	279,4	558,7	605,3	465,6
N–NH ₄ , мг/л	27,9	34,5	27,9	45,7	44,3	44,4
P–PO ₄ , мг/л	3	2,5	0,9	4,1	4,1	2,5

репрезентативности эксперимента (соответствия модельных сточных вод реальным). Была использована следующая методика приготовления модельных сточных вод:

для хлопчатобумажного производства реальные сточные воды линии беления (отводящей самые загрязненные водные растворы производства) стехиометрически кондиционировались водопроводной водой до необходимых значений табл. 2;

для молокозавода моделировалась мойка емкостей, в которых находилось молоко, с применением тех же моющих средств, что используются на производстве, с соответствующей коррекцией pH;

хозяйственно-бытовые сточные воды отбирались непосредственно из контрольного колодца водоотводящей сети и стехиометрически кондиционировались схожими сточными водами до достижения значений табл. 2.

В табл. 4 представлены натурные данные о качественном составе полученной смеси модельных сточных вод.

Таблица 5

Показатель, мг/л	Требуемые значения	Номер опыта					
		1	2	3	4	5	6
$N-NH_4$	1	0,22	0,23	0,22	2,34	2,04	2,06
$N-NO_2$	0,1	0,04	0,04	0,04	0,16	0,15	0,15
$N-NO_3$	9	2,86	3,64	11,52	8,6	8,37	8,39
BPK_5	8	4,02	3,35	1,85	6,49	3,99	3,83
$P-PO_4$	0,7	0,7	0,7	0,7	1,6	1,6	0,7

Математическое моделирование процессов очистки сточных вод

Моделирование процессов очистки сточных вод проводилось с привязкой к реальным КОС, введенным в эксплуатацию в 1984 г. и включающим два первичных радиальных отстойника диаметром 30 м, три трехкоридорных аэротенка с регенераторами общим объемом 22 680 м³ и четыре вторичных радиальных отстойника диаметром 30 м. Поскольку в современных реалиях сооружения биологической очистки с регенераторами не представляют научного и практического интереса, в модели было принято, что аэротенки реконструированы по схеме University of Cape Town (UCT) с сохранением исходного объема.

При моделировании состав исходных сточных вод соответствовал вариантам, приведенным в табл. 4. Значение ХПК переводилось в БПК₅ по уравнению, полученному на основании массива аналитических данных. Органический азот и фосфор были рассчитаны в соответствии с СП 32.13330.2018 (с Изменениями № 1, 2, 3). Концентрации загрязнений, поступающих в аэротенки, определялись с учетом эффективности первичного отстаивания с использованием рекомендаций СП 32.13330.2018 (с Изменениями № 1, 2, 3). Во всех вариантах выполненных расчетов был принят расход сточных вод 29 191 м³/сут, из которых на ночной и дневной режим водоотведения приходился расход соответственно 9341 м³ и 19 850 м³.

Объемы зон аэротенков были приняты на основании предварительных расчетов по методике ВОДГЕО/СамГТУ [5; 6] с использованием российского прикладного программного обеспечения (ПО) для комплексного технологического расчета КОС городских сточных вод «Ди-Тэч»³ исходя из сохранения общего объема существующих аэротенков: анаэробная зона — 1703 м³, аноксидная зона — 6325 м³, аэробная зона — 14 652 м³, ориентируясь на требуемое каче-

ство очищенных сточных вод, мг/л: $N-NH_4$ — 1; $N-NO_3$ — 9; $N-NO_2$ — 0,1; $P-PO_4$ — 0,7; БПК₅ — 8.

Для математического моделирования процессов очистки сточных вод в аэротенках использовалось ПО «ПОТЕНЦИАЛ» (ПОмощник ТЕх-Нолога — ЦИфровая АЛьтернатива) [7–9]. В расчетах была принята доза активного ила 3,7 г/л, средняя концентрация растворенного кислорода в аэробных зонах — 2 мг/л, реагент для удаления фосфора не дозировался. В табл. 5 представлен расчетный качественный состав очищенных сточных вод, который был получен в ПО «ПОТЕНЦИАЛ».

Анализ табл. 5 показывает, что работа сооружений при ночном режиме водоотведения (опыты 1 и 2) позволяла достигать требуемого качества очистки. В опыте 3 превышение по нитратам объясняется низким отношением $BPK_{полн} : N_{общ}$, которое составило 3,8. Дневной режим водоотведения (опыты 4–6) не позволил обеспечить требуемое качество очищенных сточных вод при принятых расчетных параметрах. Для стабильного достижения требуемого качества очищенных сточных вод ПО «ПОТЕНЦИАЛ» рекомендует увеличить концентрацию активного ила, растворенного кислорода и дозу реагента по алюминию до 5 г/л, 3 мг/л и 2,5 мг/л соответственно.

Проведенное математическое моделирование демонстрирует, что изменения количественного и качественного состава производственных сточных вод в принятых, достаточно широких пределах не оказали критичного влияния на результаты работы КОС. Как показали расчеты, требуемого качества очистки при правильно выполненном проекте КОС можно добиться за счет корректировки технологического режима. Также отметим, что реальные аэротенки обладают существенной инертностью в отношении влияния изменений состава поступающих сточных вод и технологических параметров на качество очищенной воды. Это, однако, не отменяет сделанный выше вывод.

В то же время в рамках мониторинга системы водоотведения населенного пункта с исполь-

³ ООО «ЭкоСмарт»: [электронный ресурс]. <https://ecosmartsamara.ru/>.

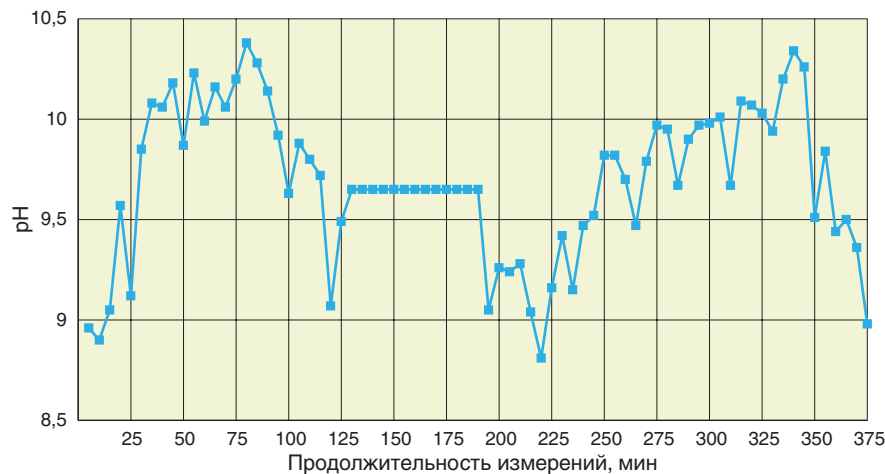


Рис. 2. Инструментально зафиксированные значения pH сточных вод в приемной камере КОС

зованием инструментальных измерительных средств (рис. 2), установленных в приемной камере КОС, фиксировались значения pH сточной воды выше 9 в течение 1,5–2 часов (более 30 раз на протяжении календарного года).

Для моделирования влияния активной реакции сточной воды на денитрификацию, аэробное окисление органических загрязнений и нитрификацию использовались значения pH, представленные на рис. 2, исходные данные для опыта № 6 – в табл. 2 и следующее уравнение из работы [5]:

$$\rho_{\max(\text{pH})} = \rho_{\max(\text{pH}_{\text{опт}})} \frac{K_{\text{pH}}}{K_{\text{pH}} + 10^{|\text{pH}_{\text{опт}} - \text{pH}|} - 1},$$

где K_{pH} – pH-константа, принято 200; $\text{pH}_{\text{опт}}$ – оптимальное значение pH, принято 7,8.

Было получено, что значение удельной скорости денитрификации по N изменялось от 1,03 до 2,85 мг/(г·ч), окисления органических загрязнений по БПК₅ – от 2,98 до 8,24 мг/(г·ч), значение удельной скорости нитрификации по N – от 0,57 до 1,58 мг/(г·ч). Таким образом, моделирование показало, что при pH 10,38 значение БПК₅ очищенной воды составит 53 мг/л, концентрация азота аммонийного – 32 мг/л, т. е. процесс очистки прекратится практически полностью. Необходимо отметить, что сооружения биологической очистки не только обладают большой инертностью, как было указано выше, но еще из-за большого общего объема сооружений и наличия циркуляционных потоков изменение pH поступающей воды будет менять pH иловой смеси лишь постепенно. К тому же биоценоз активного ила имеет способность акклиматизироваться к среде обитания, если условия не выходят за граничные значения.

Тем не менее моделирование условий функционирования КОС с повышенными значе-

ниями pH демонстрирует существенное ухудшение качества очищенных сточных вод. Это обосновывает целесообразность оперативного предиктивного мониторинга качества сточных вод, отводимых промышленными абонентами в городскую сеть канализации, например по pH, определение которого является достаточно простым, но в то же время значимым для работы очистных сооружений. Аналогично может оказаться информативным контроль других, достаточно просто измеряемых показателей – окислительно-восстановительного потенциала и электропроводности сточных вод промышленных абонентов. При этом должен использоваться объектно-ориентированный подход: подразумевается предварительный системный анализ и причинно-следственное моделирование режимов работы всей водоотводящей сети и КОС конкретного населенного пункта как единого технологического комплекса.

При этом укрупненный последовательный алгоритм координации мониторинга и прогноза параметров водоотведения и системы управления очисткой сточных вод определяет ключевым приоритетом фактические и прогнозные условия функционирования КОС (рис. 3).

Предлагается следующая последовательность (рис. 3) предиктивного функционирования системы водоотведения:

мониторинг и прогноз показателей качества городских сточных вод до их поступления на КОС на основе распределенного сбора информации, включая данные аккредитованных лабораторных измерений и оперативный контроль инструментальными средствами; построение динамической модели, которая выполняет прогноз значений на входе КОС, ключевых для

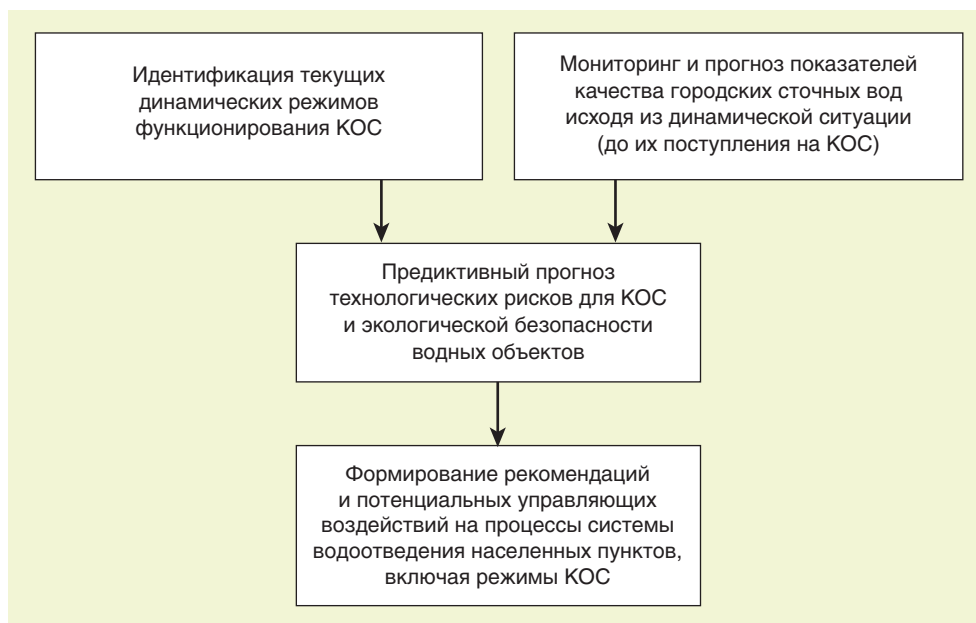


Рис. 3. Последовательность координации работы систем мониторинга водоотведения и управления процессами КОС

конкретного населенного пункта показателей качества сточных вод; ранжирующая оценка отдельных веток водоотводящей сети [10] с целью оптимизации контроля отдельных абонентов, в том числе аккредитованной лабораторией организации ВКХ;

идентификация динамических режимов функционирования КОС с использованием программных средств, моделирующих их работу, например ПО «ПОТЕНЦИАЛ» [7–9];

оперативный и предиктивный анализ режимов очистки сточных вод с оценкой ее потенциально слабых мест (включая возможность поступления залповых концентраций отдельных загрязнителей, которая спрогнозирована исходя из текущих и перспективных параметров водоотведения); формирование модели технологических опасностей для КОС и экологических рисков для природных водных объектов;

формирование с использованием интеллектуальных технологий оперативных и долгосрочных рекомендаций по управлению КОС и водоотводящей сетью, расчет в режиме реального времени целевых задач для систем управления подсистемами системы водоотведения, например для SCADA КОС.

Обоснованный подход позволяет управлять работой системы водоотведения как единым технологическим комплексом, что значительно повышает его прогнозируемость и устойчивость к нештатным ситуациям, что в свою очередь значительно снижает риски возникновения чрезвычайных ситуаций антропогенного характера в природных водных объектах.

Выводы

1. Выполнен системный анализ работы системы водоотведения населенного пункта как объекта управления, который характеризует технологический комплекс транспортировки и очистки сточных вод как распределенную систему, поскольку ее элементы выполняют одну цель, но существуют во многом независимо друг от друга; выявлен низкий уровень наблюдаемости процессов, что характеризует ее как слабоуправляемый объект.

2. На основе физического имитационного моделирования состава городских сточных вод с наличием хлопчатобумажного производства и молокозавода в ПО «ПОТЕНЦИАЛ» выполнена симуляция работы канализационных очистных сооружений, которая показала отсутствие критического влияния на результаты очистки; в то же время резкое изменение pH исходных сточных вод способно нарушить процесс биологической очистки.

3. Исходя из наличия залповых концентраций загрязнителей, которые могут фиксироваться даже на протяжении нескольких часов и негативно действовать на эффективность работы КОС, предложена последовательность управления системой водоотведения как единым технологическим комплексом на основе интеграции в информационно-аналитическую систему различных математических продуктов и программного обеспечения. Это значительно повышает прогнозируемость и устойчивость процессов транспортировки и очистки сточных вод, снижает риски возникновения техногенных чрезвычайных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 10-2019. – М.: Бюро НДТ, 2019. 416 с.
Ochistka stochnykh vod s ispol'zovaniem tsentralizovannykh sistem vodootvedeniia poselenii, gorodskikh okrugov. Informatsionno-tekhnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiam ITS 10-2019 [Wastewater treatment with the use of public wastewater disposal systems of communities, urban districts. Information and technical reference book of the best available technologies ITS-2019. Moscow, Biuro NDT Publ., 2019, 416 p.].
2. Смирнов В. Б., Шевченко Н. П. Влияние поступающих со стоками тяжелых металлов на очистные сооружения и процесс биологической очистки в аэротенках // Вода Magazine. 2018. № 6 (130). С. 32–35.
Smirnov V. B., Shevchenko N. P. [Effect of heavy metals in incoming wastewater on the treatment facilities and biological treatment process in aeration tanks]. *Voda Magazine*, 2018, no. 6 (130), pp. 32–35. (In Russian).
3. Охтилев М. Ю., Штепа В. Н., Баженов В. И. Интеллектуальная информационно-аналитическая платформа управления организациями ВКХ // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2025. № 2. С. 20–29.
Okhtilev M. Yu., Shtepa V. N., Bazhenov V. I. [Intelligent information-analytical platform for water and wastewater utilities management]. *Nailuchshie Dostupnye Tekhnologii Vodosnabzheniia i Vodootvedeniia*, 2025, no. 2, pp. 20–29. (In Russian).
4. Алексеев М. И., Сколупович Ю. Л., Похил Ю. Н. Эксплуатация систем водоснабжения и водоотведения – М.: Издательство АСВ, 2024. 268 с.
Alekseev M. I., Skolubovich Yu. L., Pokhil Yu. N. *Ekspluatatsiia sistem vodosnabzheniia i vodootvedeniia* [Operating water supply and wastewater disposal systems. Moscow, ASV Publ., 2024, 268 p.].
5. Степанов С. В. Технологический расчет аэротенков и мембранных биореакторов: учебное пособие. – М.: Издательство АСВ, 2020. 224 с.
Stepanov S. V. *Tekhnologicheskii raschet aerotנקov i membrannykh bioreaktorov: uchebnoe posobie* [Process calculation of aeration tanks and membrane bioreactors: a study guide. Moscow, ASV Publ., 2020, 224 p.].
6. Швецов В. Н., Морозова К. М., Степанов С. В. Расчет сооружений биологической очистки городских и производственных сточных вод в аэротенках с удалением биогенных элементов // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 9. С. 26–38.
Shvetsov V. N., Morozova K. M., Stepanov S. V. [Designing facilities for municipal and industrial wastewater biological treatment in aeration tanks with nutrients removal]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2018, no. 9, pp. 26–38. (In Russian).
7. Степанов С. В., Харькина О. В., Авдеенков П. П., Лазунин М. В., Пономаренко О. С. Математическое моделирование процессов очистки сточных вод в аэротенках // Водоснабжение и санитарная техника. 2024. № 9. С. 22–31. DOI: 10.35776/VST.2024.09.04.
Stepanov S. V., Khar'kina O. V., Avdeenkov P. P., Lazunin M. V., Ponomarenko O. S. [Mathematical simulation of wastewater treatment processes in aeration tanks]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2024, no. 9, pp. 22–31. DOI: 10.35776/VST.2024.09.04. (In Russian).
8. Степанов С. В., Егорова Ю. А., Харькина О. В., Авдеенков П. П., Нестеренко О. И., Лазунин М. В., Стрелкова Т. А., Злобин И. Д. Результаты математического моделирования процессов очистки сточных вод в аэротенках на ГОКС г. Самары в период реконструкции и пусконаладочных работ // Водоснабжение и санитарная техника. 2024. № 11. С. 24–31. DOI: 10.35776/VST.2024.11.03.
Stepanov S. V., Egorova Yu. A., Khar'kina O. V., Avdeenkov P. P., Nesterenko O. I., Lazunin M. V., Strelkova T. A., Zlobin I. D. [Results of the mathematical simulation of wastewater treatment processes in aeration tanks at the Samara Municipal Wastewater Treatment Facilities during the upgrade and commissioning]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2024, no. 11, pp. 24–31. DOI: 10.35776/VST.2024.11.03. (In Russian).
9. Харькина О. В., Степанов С. В., Авдеенков П. П., Лазунин М. В., Егорова Ю. А., Нестеренко О. И., Стрелкова Т. А. Помощник технолога: примеры использования ПО «ПОТЕНЦИАЛ» // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2024. № 6. С. 29–38.
Khar'kina O. V., Stepanov S. V., Avdeenkov P. P., Lazunin M. V., Egorova Yu. A., Nesterenko O. I., Strelkova T. A. [Process engineer assistant: examples of using POTENTIAL software]. *Nailuchshie Dostupnye Tekhnologii Vodosnabzheniia i Vodootvedeniia*, 2024, no. 6, pp. 29–38. (In Russian).
10. Штепа В. Н., Золотых Н. Ю., Киреев С. Ю. Обоснование и схемы использования ранжирующих измерительных систем экологического мониторинга и интеллектуального анализа режимов водоотведения // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. 2023. № 1. С. 94–103.
Shtepa V. N., Zolotykh N. Yu., Kireev S. Yu. [Substantiation and pattern of using ranking measuring systems for environmental monitoring and intelligent analysis of water disposal modes]. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Series F: Civil Engineering. Applied Sciences*, 2023, no 1, pp. 94–103. (In Russian).