

М. Ю. Охтилев*

доктор технических наук, профессор

В. Н. Коромысличенко*

кандидат технических наук, доцент

П. А. Охтилев*

кандидат технических наук

А. В. Кулешов**

заместитель директора Департамента обеспечения качества и надежности ракетно-космической и боевой ракетной техники

В. Н. Штепа***

доктор технических наук, доцент

О. П. Ничипорович****

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

**Госкорпорация «Роскосмос»

***Белорусский государственный технический университет

****Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук»

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Рассмотрены концептуальные вопросы технологии контроля водоснабжения и водоотведения промышленных объектов на основе интеллектуальных цифровых двойников. Цель – рассмотреть утверждение о том, что автоматизация проектирования и выбора проектных решений конфигураций перспективных систем контроля водоснабжения, водопользования и водоотведения промышленных объектов на основе адаптивных цифровых двойников должна лежать в поле системно-кибернетического подхода и многоцелевого применения теории искусственного интеллекта в гармоничном сочетании с другими фундаментальными принципами, методами и концепциями комплексного моделирования при создании соответствующего специального модельно-алгоритмического и программно-математического обеспечения. Предложено в основании интеллектуальной информационно-аналитической технологии создания и применения производственных автоматизированных систем концептуального цифрового инжиниринга перспективных образцов системы контроля водоснабжения, водопользования и водоотведения промышленных объектов на основе интеллектуальных цифровых двойников положить извлечение, формализацию, обработку и использование данных и информации прецедентов опытно-конструкторских решений, а также явных и неявных слабоформализованных знаний о рассматриваемой предметной области с использованием концепций и принципов, развиваемых в рамках системно-кибернетического подхода и инженерии знаний.

Ключевые слова: водоснабжение, водоотведение, цифровой двойник, искусственный интеллект, киберфизические системы, слабоформализованные знания.

М. Yu. Okhtilev*

Dr. Sc., Tech., Professor

V. N. Koromyslichenko*

PhD, Tech., Associate Professor

P. A. Okhtilev*

PhD, Tech.

A. V. Kuleshov**

Deputy Director of the Department of Quality Assurance and Reliability of Rocket, Space and Combat Rocket Technology

V.N. Shtepa***

Dr. Sc., Tech., Associate Professor

O.P. Nichiporovich****

PhD, Tech., Senior Research Employee

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

**Roscosmos State Corporation

***Belarusian State Technical University

****Federal State Budgetary Institution of Science "St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences"

CONCEPTUAL ISSUES OF TECHNOLOGY FOR MONITORING WATER SUPPLY AND SANITATION OF INDUSTRIAL FACILITIES BASED ON INTELLIGENT DIGITAL TWINS

The conceptual issues of technology for monitoring water supply and sanitation of industrial facilities based on intelligent digital twins are considered. Purpose: to consider the statement that automation of design and selection of design solutions for configurations of promising systems for monitoring water supply, water use and sanitation of industrial facilities based on adaptive digital twins should lie in the field of a systemic cybernetic approach and the multipurpose application of artificial intelligence theory in in harmonious combination with other fundamental principles, methods and concepts of complex modeling in the creation of appropriate special model-algorithmic and software-mathematical support. Result: it is proposed to base the intelligent information and analytical technology for the creation and application of production automated systems for conceptual digital engineering of promising samples of water supply, water use and sanitation systems for industrial facilities based on intelligent digital twins on the extraction, formalization, processing and use of data and information use cases of development solutions, as well as explicit and implicit weakly formalized knowledge about the subject area under consideration using concepts and principles developed within the framework of the system-cybernetic approach and knowledge engineering.

Keywords: water supply, sanitation, digital twin, artificial intelligence, cyber-physical systems, poorly formalized knowledge.

В современных условиях необходимости обеспечения технологической независимости РФ в различных отраслях экономики и перехода к индустриальной модели конвейерного производства, обеспечивающей ускоренный вывод на рынок и повышение уровня серийности конкурентоспособных систем на основе цифровых двойников, одной из приоритетных задач становится сквозная цифровизация управления их жизненным циклом. Эта задача должна решаться с самых первых этапов разработки – оперативного анализа, синтеза, отработки вариантов и выбора корректных проектных решений, для которых наиболее высока критичность и стоимость ошибок при последующем производстве, внедрении и применении цифровых двойников и систем на их основе.

Особую актуальность, научную и практическую значимость начинает приобретать проблема разработки научных основ и программно-математического обеспечения интеллектуальной информационно-аналитической технологии создания и применения отечественной производственной автоматизированной системы распределенного моделирования ориентированного концептуального инжиниринга (model based software engineering, concurrent engineering), позволяющего осуществлять быстрое прототипирование концептуальных цифровых двойников альтернативных вариантов конфигураций перспективных приборов и изделий в совместной работе междисциплинарных коллективов разнопрофильных специалистов с целью оперативного анализа и синтеза эффективных проектных решений, учитывающих совокупный опыт специалистов, при минимизации временных, материальных и кадровых затрат, а также ошибок проектирования.

Разработка методологических основ интеллектуальной информационно-аналитической технологии создания и применения производственных автоматизированных систем концептуального цифрового инжиниринга перспективных образцов системы контроля водоснабжения, водопользования и водоотведения промышленных объектов на основе интеллектуальных цифровых двойников должна строиться на основе извлечения, формализации, обработки и использования данных и информации прецедентов опытно-конструкторских решений, а также явных и неявных слабо-формализованных знаний о рассматриваемой предметной области с использованием концепций и принципов, развиваемых в рамках системно-кибернетического подхода и инженерии знаний. Задача состоит в разработке новых оригинальных методов автоматизации и интеллектуализации, отличающихся от известных и традиционных подходов «лоскутной» автоматизации проектирования ориентацией на комплексное решение набора взаимосвязанных прикладных задач автоматизации концептуального моделирования ориентированного проектирования и обликового дизайна перспективных систем контроля промышленных объектов на основе интеллектуальных цифровых двойников. При этом, в качестве фундаментального базиса для автоматизации выработки проектных решений должны использоваться экспертные знания и прецеденты опытно-конструкторских решений, лежащие в основе существующих процессов проектирования. Необходимо заложить научные основы новой сквозной интеллектуальной информационно-аналитической технологии анализа, синтеза и обоснованного выбора сатисфакционных альтернативных конфигураций концептуальных проектных решений перспективных образцов изделий с требуемыми тактико-техническими характеристиками, обеспечивающей корректные процедуры вывода обоснованных решений на системном, методологическом, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях, что гарантированно снижает количество ошибок в процессах концептуального проектирования и повышает его оперативность.

Обобщенное концептуальное и формальное полимодельное описание единой интеллектуальной информационно-технологической среды распределенного концептуального цифрового инжиниринга перспективных образцов систем контроля водоснабжения и водоотведения промышленных объектов на основе интеллектуальных цифровых двойников на основе организации единого пространства интеграции и манипулирования данными, информацией и знаниями предполагает разработку принципиально нового полимодельного комплекса описания согласованной распределенной разработки цифровых прототипов перспективных систем контроля на основе использования новой концепции, модельно-алгоритмического и методического обеспечения применения комплекса онтологических семантических медиаторов (программных предметных посредников обеспече-

ния бесшовной интеграции и интероперабельности данных и приложений) в мультиагентной интерпретации их совместного функционирования, отличающегося от существующих моделей и подходов конструктивным комплексным учетом факторов организации потоковых параллельных асинхронных процессов совместного проектирования междисциплинарных коллективов разнопрофильных специалистов, а также обеспечения семантической структурно-функциональной и структурно-параметрической совместимости по интегрируемым данным, информации и знаниям об опытно-конструкторских решениях.

Задача синтеза облика автоматизированной системы концептуального цифрового инжиниринга перспективных образцов систем контроля водоснабжения, водопользования и водоотведения промышленных объектов на основе интеллектуальных цифровых двойников и ее специального модельно-алгоритмического и программно-математического обеспечения состоит в унифицированности и многофункциональности созданной архитектурной и программной спецификации, отличающейся от других реализаций совокупным учетом полного спектра факторов организации параллельного и асинхронного моделирования проектирования обличкового дизайна изделий. Задача состоит в конвейеризации разработки опытно-конструкторских решений как первоочередного шага для перехода к индустриальной модели производства и цифровизации управления жизненным циклом. Применение конкретных реализаций интеллектуальной технологии может стать опорной точкой организации, в долгосрочной перспективе, сквозной технологии цифровизации предприятий. А результаты концептуального проектирования могут стать первым в последовательности элементом сквозной цифровой нити цифрового двойника, на основе которой детализируются и уточняются конкретные прикладные технические решения.

В части методологии и информационной технологии говоря об общих тенденциях, формирующихся в области создания и применения автоматизированных систем (АС), обеспечивающих решение различных классов задач (например, задач концептуального цифрового инжиниринга (КЦИ) следует отметить, что объективно наблюдается переход от «стихийного» этапа, когда применялся метод «проб и ошибок», к «сознательному» этапу, характерной чертой которого является обязательное создание научных основ, методологических принципов и подходов к построению разрабатываемого программного и программно-математического обеспечения технологий создания и применения производственных автоматизированных систем проектирования технических артефактов на основе манипулирования прецедентными массивами данных и экспертными знаниями [1–15]. При этом, очень важно уже на этапе определения облика будущей АС КЦИ оценить принципиальную возможность реализации выбираемого вида автоматизации и оценить не только положительный эффект от применения создаваемого аппаратно-программного комплекса, но и риски возникновения отрицательных эффектов [16].

Переходя к рассмотрению АС КЦИ, в качестве которых в предлагаемом проекте рассматриваются сложные организационно-технические системы баз знаний (СОТС БЗ), манипулирование прецедентными массивами данных и экспертными знаниями которых реализуется методами искусственного интеллекта, в том числе с помощью нейронных сетей на базе онтологий предметной области, для концептуального инжиниринга перспективных образцов систем контроля водоснабжения, водопользования и водоотведения промышленных объектов на основе интеллектуальных цифровых двойников при наличии большой разнотипности как самих СОТС БЗ (в том числе их сменяемости), так и непосредственно обрабатываемой информации. При проектировании новых версий специального программного обеспечения (СПО) автоматизированного манипулирования прецедентными массивами данных и экспертными знаниями необходимо учитывать целый спектр требований [1, 2, 17–20]. Среди них можно назвать такие, как: малые сроки «постановки на информационное обслуживание» новых СОТС БЗ и, соответственно, небольшая стоимость этого процесса; невысокие требования к программистской квалификации сопровождающего это СПО персонала; унификация и модульность построения используемых в СПО программно-алгоритмических средств, что позволяет быстро комплектовать нужные версии в зависимости от конкретных условий и целей применения; устойчивая (надежная) работа СПО при возникновении различных нештатных (непредусмотренных специалистами по соответствующим СОТС БЗ) ситуаций; режим обработки данных «в реальном времени».

Для того чтобы в максимальной степени удовлетворить все перечисленные противоречивые требования, предъявляемые как к облику СПО СОТС БЗ, так и в целом к АС КЦИ необходимо отойти от традиционно используемых при проектировании таких систем информационных технологий и архитектур и учесть следующие основные современные тенденции и перспективы развития информационных технологий манипулирования знаниями и открытых (сервис-ориентированных) систем [20]:

- переход от классических вычислений к альтернативным способам организации вычислительного процесса (облачные, граничные, туманные вычисления);
- использование технологии активных объектов;
- ориентация на приоритет модели, а не алгоритма;
- реализация естественного параллелизма вычислений;
- проактивность и самоорганизация вычислений;
- представление экспертных знаний и прецедентных массивов данных в онтологической и гибридной парадигме.

В части водоотведения, водопользования и водоснабжения на данный момент на производственных объектах Российской Федерации и Республики Беларусь имеет место неэффективное и во многом слабо контролируемое использование на производстве водных ресурсов. Во многом такая негативная ситуация вызвана рядом факторов, среди которых: использование устаревшего оборудования, полное отсутствие систем управления водопользованием и неоптимальными технологическими процессами. В тоже время нерациональное использо-

вания водных ресурсов вызывает увеличение себестоимости выпускаемой продукции, влияет на устойчивость производства и приводит к негативным экологическим последствиям.

Среди основных причин, которые не позволяют наладить эффективное экологическое управление сетью водопользования – незначительное количество измерительных средств, способных функционировать в сегментах сети (производственные линии, колодцы, коллектора, насосные станции, напорный трубопровод), а также методик формирования распределенной структуры средств измерения, принципов и подходов импактного мониторинга применительно к объекту исследования в условиях неполноты получаемой информации о параметрах водопользования.

Анализ показывает, что основными целями экологического мониторинга производственного водопользования являются [21, 22]: 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 разработка оценок состояния водных экосред сопровождается перспективными целями разработки и совершенствования следующих базовых методологических элементов [23, 24]:

- 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.

Задача повышения эффективности и экологической безопасности производственного водопользования обычно рассматривается в парадигме того, что проблема оперативного и распределенного получения адекватной информации об объеме и качестве потребления водных ресурсов уже решена и данные уже структурированы и постоянно обновляются в специализированных базах. В действительности такая научно-практическая задача на данный момент системно не решена не только в Российской Федерации и Республике Беларусь, но и в мировом масштабе, что связано с рядом факторов:

- отсутствием единой информационной экосреды производственного водопользования на интеллектуальных платформенных решениях;
- отсутствием сквозных моделей использования водных ресурсов с прогнозом их расходов и показателей качества.

Все эти и некоторые другие (не упомянутые здесь) тенденции приведут со временем к тому, что прикладные программные системы будут строиться на основе приоритетности онтологической модели (а не алгоритма), мультиагентности и ассоциативно самоорганизующемуся недетерминированном параллельном вычислительном процессе манипуляции знаниями.

В связи с этим, следует обоснованно утверждать, что автоматизация проектирования и выбора проектных решений конфигураций перспективных систем контроля водоснабжения, водопользования и водоотведения промышленных объектов на основе адаптивных цифровых двойников должна лежать в поле системно-кибернетического подхода и многоцелевого применения теории искусственного интеллекта в гармоничном сочетании с другими фундаментальными принципами, методами и концепциями комплексного моделирования при создании соответствующего специального модельно-алгоритмического и программно-математического обеспечения (СМАО) цифровизации, извлечения и манипулирования профильными экспертными знаниями в АС КЦИ. Однако проведенный обзор и анализ существующих отечественных и зарубежных версий СМАО в сфере автоматизации проектирования и создания цифровых двойников показывает, что предложенные и реализованные модели, прототипы и программные продукты предполагают создание отдельно взятых прикладных моделей и алгоритмов или их линейной совокупности в виде, по сути, разновидностей реализаций библиотек стандартизованных расчетных типовых задач (типа «черный ящик») и баз данных с расширенными возможностями семантического поиска, не учитывающих особенности предметной области, а используемые методы машинного обучения, используемые для генеративного проектирования, не имеют критически важной объяснительной компоненты генерируемых результатов и не учитывают семантические и прагматические составляющие формируемых проектных решений.

Необходим переход от традиционно используемых подходов последовательного исследования и проработки технических решений в ручном режиме на базе опыта конструкторов к автоматизированному параллельному проектированию (инжинирингу) концептуального облика перспективных изделий в составе междисциплинарных команд разнопрофильных специалистов в единой информационно-технологической среде.

Библиографический список

1. Искусственный интеллект в космической технике. Состояние. Перспективы применения: моногр. / А. Н. Балухто, В. В. Хартов, А. А. Романов [и др.]; под ред. докт. техн. наук А.Н. Балухто. – М.: Радиотехника, 2021. – 434 с.

2. Охтилев, М. Ю. Системы искусственного интеллекта и их применение в автоматизированных системах мониторинга состояния сложных организационно-технических объектов: моногр. – СПб.: ГУАП, 2018. – 261 с.
3. Охтилев, М. Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
4. Охтилев, М. Ю. Технология автоматизированной информационно-аналитической поддержки жизненного цикла изделий на примере единого виртуального электронного паспорта космических средств / М. Ю. Охтилев, А. А. Ключарев, П. А. Охтилев, А. Э. Зянчурин // Изв. вузов. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, №11. – С. 1012–1019.
5. Неверов, А. В. Экономика природопользования / А. В. Неверов. – Минск: БГТУ, 2008. – 554 с.
6. Княгинин, В. Н. Приоритетные направления внедрения технологий умного города в российских городах пространственное развитие: экспертно-аналит. докл. / В. Н. Княгинин, Центр стратегических разработок «Северо-Запад». – Режим доступа: <https://www.csr.ru/wp-content/uploads/2018/06/Report-Smart-Cities-WEB.pdf>.
7. Алексеев, Е. В. Основы моделирования систем водоснабжения и водоотведения: учеб. пособие / Е. В. Алексеев, В. Б. Викулина, П. Д. Викулин. – М.: Издательство МИСИ – МГСУ, 2017. – 126 с. – ISBN 978-5-7264-1641-0 // ЭБС Консультант студента. – URL: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785726416410.html> (дата обращения: 23.09.2022). – Режим доступа: по подписке.
8. Предиктивное управление процессом биологической очистки сточных вод на основе нейросетевого прогнозирования pH / В. Н. Штепа [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 1 (133). – С. 149–155.
9. Shtepa, V. Conceptual Model of Digitization of the Municipal Wastewater Disposal Systems / V. Shtepa, N. Junakova, N. Zaiets [и др.] // Water. – 2024. – Vol. 16. – 3483. – URL: <https://doi.org/10.3390/w16233483>.
10. Пострыбайло, М. В. Модельные оценки параметров пассивных радиотехнических систем мониторинга грозовой активности / М. В. Пострыбайло, Т. М. Татарникова // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2024. – Т. 67, № 4. – С. 368–374. – DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-4-368-374. Импакт-фактор 0,52.
11. Татарникова, Т. М. Имитационная модель одноранговой беспроводной сенсорной сети / Т. М. Татарникова, В. А. Миклуш // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2023. – Т. 17, № 3. – С. 20–26. – DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-3-20-26. Импакт-фактор 1,552.
12. Татарникова, Т. М. Алгоритм контроллера нечеткой логики для размещения файлов в системе хранения данных / Т. М. Татарникова, Е. Д. Архипцев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2023. – Т. 23, № 6. – С. 1171–1177. – DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-6-1171-1177. Импакт-фактор 0,684.
13. Татарникова, Т. М. Метрические характеристики обнаружения аномального трафика в сетях интернета вещей / Т. М. Татарникова, П. Ю. Богданов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2022. – Т. 16, № 1. – С. 15–21. – DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-1-15-21. Импакт-фактор 1,552.
14. Татарникова, Т. М. Обнаружение атак в сетях интернета вещей методами машинного обучения / Т. М. Татарникова, П. Ю. Богданов // Информационно-управляющие системы. – 2021. – № 6 (115). – С. 42–52. – DOI: 10.31799/1684-8853-2021-6-42-52. Импакт-фактор 0,862.
15. Интеллектуальная технология цифровизации информационно-аналитического обеспечения жизненного цикла ракетно-космической техники / Ю. А. Антохина, М. Ю. Охтилев, Т. М. Татарникова [и др.] // Прикладной искусственный интеллект: перспективы и риски: Междунар. науч. конф. (СПб. 17 октября 2024 г.): сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2024. – 432 с. – ISBN 978-5-8088-1975-7. DOI: 10.31799/978-5-8088-1975-7-2024.
16. Обзор состояния исследований задач автоматизированного проектирования интеллектуальных систем поддержки принятия решений при управлении сложными объектами на всех этапах их жизненного цикла / П. А. Охтилев, А. Д. Бахмут, В. Н. Коромысличенко [и др.] // Тр. XX Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». – Самара, 2018. – С. 307–313.
17. Ontology-Based Production Simulation with OntologySim / C. M. Marvin, K. Lars, K. Andreas, L. Gisela // Appl. Sci. – 2022. Vol. 12 (3). – 1608.
18. Using Ontologies to Create Machine-Actionable Datasets: Two Case Studies / J.-L. Hippolyte, M. Romanchikova, M. Bevilacqua [et al.] // J. Metrology. – 2023. – Vol. 3. – P. 65–80. URL: <https://doi.org/10.3390/metrology3010003> (дата обращения: 04.02.2025).
19. An Ontology-based Engineering system to support aircraft manufacturing system design / Arista R. [et al.] // Journal of Manufacturing Systems. – 2023. – Vol. 68. – P. 270–288. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.02.012> (дата обращения: 04.02.2025).
20. Toward Conceptual Analysis of Cyber-Physical Systems Projects Focusing on the Composition of Legacy Systems / A. A. S. Ivo, S. G. Ribeiro, F. Mattiello-Francisco, A. Bondavalli // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 58136–58158. – DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3284039.
21. Мониторинг водных объектов: цель, категории пунктов наблюдения, периодичность проведения // Портал FB.ru. – URL: <https://fb.ru/article/461139/monitoring-vodnyih-obyektov-tsel-kategorii-punktov-nablyudeniya-periodichnost-provedeniya?ysclid=lmcdm3hxuy531719348> (дата обращения: 04.02.2025).
22. 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.

23. 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.
24. Andersen Predicting the ecological status of rivers and streams under different climatic and socioeconomic scenarios using Bayesian Belief Networks / E. Molina-Navarro, P. Segurado, P. Branco [et al.] // Limnologia. 2020. – Vol. 80. – 125742. URL: <https://doi.org/10.1016/j.limno.2019.125742> (дата обращения: 04.02.2025).