

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ВИЗУАЛЬНОМ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ОБСЛЕДОВАНИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Качаев А.Е., Турапин С.С.

ФГБНУ ВНИИ «Радуга», Радужный, e-mail: doctor_cement@mail.ru

Целью исследования является формирование методологии использования технологий информационного моделирования объектов гидротехнического назначения для их эффективного обследования с целью проведения последующих капитальных ремонтов или реконструкции. В процессе проведения исследования сформирована методология применения возможностей информационного моделирования при сопровождении визуального и инструментального обследования гидротехнических сооружений. Разработаны подходы к использованию различных систем автоматизированного проектирования и расчетов объектов гидротехнического назначения при проведении мероприятий по их обследованию. Обозначены основные производители и программные комплексы для моделирования технологических процессов в гидротехническом строительстве, которые могут быть применены в концепции информационного моделирования при обследовании объектов подобного рода. Описаны этапы применения информационного моделирования на различных стадиях обследования объектов гидротехнического назначения с учетом как рельефа, на котором располагается объект обследования, так и состояния самого гидротехнического сооружения. Установлена функциональная связь между работами по обследованию гидротехнических сооружений, полученной в результате этих работ информацией и интеграцией ее в среды различных систем автоматизированного проектирования и расчетов для анализа данных и выработки конечных рекомендаций. Определено, что безопасная эксплуатация гидротехнических сооружений достигается за счет эффективного обследования объектов с применением информационного моделирования. Показаны примеры интеграции данных, полученных с помощью лазерного сканирования рельефа и расположенного на нем гидротехнического сооружения, в цифровую модель местности с цифровым двойником гидротехнического сооружения.

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, информационное моделирование, реконструкция, цифровой двойник, обследование, плотина

USE OF BIM-TECHNOLOGIES IN VISUAL AND INSTRUMENTAL INSPECTION OF HYDRAULIC STRUCTURES

Kachaev A.E., Turapin S.S.

Federal State Budgetary Scientific Institution All-Russian Research Institute «Raduga»,
Raduzhny, e-mail: doctor_cement@mail.ru

The objective of the study is to develop a methodology for using information modeling technologies for hydraulic engineering facilities for their effective inspection for subsequent major repairs or reconstruction. In the course of the study, a methodology was developed for using information modeling capabilities to accompany visual and instrumental inspection of hydraulic engineering structures. Approaches to using various automated design and calculation systems for hydraulic engineering facilities during inspection activities have been developed. The main manufacturers and software packages for modeling technological processes in hydraulic engineering construction that can be used in the concept of information modeling during inspection of such facilities have been identified. The stages of using information modeling at various stages of shelling hydraulic engineering facilities are described, taking into account both the relief on which the inspection object is located and the state of the hydraulic engineering structure itself. A functional relationship has been established between the work on inspection of hydraulic engineering structures, the information obtained as a result of these works, and its integration into the environments of various automated design and calculation systems for data analysis and development of final recommendations. It is determined that safe operation of hydraulic structures is achieved through effective inspection of objects using information modeling. Examples of integrating data obtained using laser scanning of the terrain and the hydraulic structure located on it into a digital terrain model with a digital twin of the hydraulic structure are shown.

Keywords: hydraulic structure, information modeling, digital twin, reconstruction, survey, dam

Введение

Гидротехнические сооружения (ГТС) – это объекты капитального строительства повышенного и нормального уровня ответственности [1, с. 10]. Объекты гидротехнического назначения постоянно контактируют с водой, оказывающей на них контактное, химическое и бактериологическое воздействие. Поэтому техническое состояние ГТС обеспечивается их эффективной экс-

плуатацией, своевременным техническим обслуживанием, постоянным мониторингом, текущим и капитальным ремонтами или реконструкцией (сносом) [2, с. 125]. Все вышеперечисленные виды работ укладываются в концепцию информационного моделирования BIM (Building information modeling). BIM-технологии используются для объектов капитального строительства на всем протяжении их жизненного цикла:

от проектирования и строительства до эксплуатации, реконструкции и сноса [3, с. 242].

При этом необходимо отметить, что и проектируемые объекты гидротехнического назначения, и действующие могут активно пользоваться возможностями информационного моделирования. При создании цифровых моделей гидротехнических сооружений применяются разносторонние программные продукты – как отечественных разработчиков (Renga Software, Аскон, Нанософт разработка и др.), так и иностранных представителей систем автоматизированного проектирования (Midas IT, Autodesk, Dassault Systemes и др.). Наиболее распространенными на сегодняшний день средами, в которых осуществляется разработка цифровых двойников гидротехнических сооружений, являются расчетный и моделирующий комплекс Midas GTS NX (аналог расчетного комплекса Plaxis), платформа для проектирования NanoCAD с приложением Geonics (аналог AutoCAD и ArchiCAD), программы для проектирования и расчетов металлических и железобетонных конструкций SolidWorks, Renga, ЛИРА-САПР и др. [3, с. 304].

Использование современных средств автоматизированного проектирования объектов гидротехнического назначения открывает различные возможности перед ГТС как на этапе их разработки, так и на этапах их дальнейшего жизненного цикла. Наличие различных типов ГТС (мелиоративное хозяйство, водоснабжение населенных пунктов и городов) обуславливает при оценке их технического состояния во время визуального или инструментального обследования накопление информации об их техническом состоянии. Сбор и анализ полученной при обследовании ГТС информации выявляют пути решения различных задач по поддержанию ГТС в технически исправном состоянии [4].

Важно отметить, что концептуальный подход BIM-технологий применительно к объектам гидротехнического назначения сводится к анализу разносторонней информации об объекте, полученной в результате различных изысканий (геология, геодезия, климатология и др.), методов оценки технического состояния сооружения, оценки и разработки цифровой модели рельефа (местности) (ЦМР, ЦММ), интеграции полученной информации в общую цифровую модель «объект – цифровой двойник – обследование (или строительство)». С помощью технологий информационного моделирования и различных программных продуктов, возможности которых интегрированы в концепцию BIM, можно быстро

и с высокой вероятностью смоделировать состояние объекта на любом этапе его жизненного цикла.

При визуальном обследовании ГТС выявляются различные технические нарушения целостности объектов:

- на поверхности объекта могут наблюдаться следы коррозии металлических конструкций, коррозии бетона и арматуры, усадочные трещины, неровности, включения, нарушение защитного слоя бетона, пустоты, высолы, пятна ржавчины или масла и др.;

- внутри конструктивных элементов могут быть выявлены специальными методами (например, методом неразрушающего контроля) пустоты, образовавшиеся на арматурном каркасе, нарушение целостности швов при бетонировании или укладке бетонных плит, раковины, оголение арматуры в защитном слое бетона и др.

Все вышеуказанные нарушения целостности объектов гидротехнического назначения происходят при повышенном контакте строительных материалов объекта с водой, влажными грунтами, при протекании различных химических и бактериологических процессов различной интенсивности. Нарушения целостности объектов гидротехнического назначения определяются в соответствии с [5] и сводятся к визуальному и инструментальному обследованию их технического состояния.

Цель исследования – сформировать методологию использования технологий информационного моделирования объектов гидротехнического назначения для их эффективного обследования с целью проведения последующих капитальных ремонтов или реконструкции.

Материал и методы исследования

Аналитический метод исследования возможностей технологий информационного моделирования для объектов гидротехнического назначения позволяет раскрыть и алгоритмизировать использование программных комплексов для обработки той или иной информации, полученной в результате комплексного (всестороннего) обследования ГТС. Так, например, одним из начальных этапов обследования ГТС является создание цифровой модели рельефа (ЦМР) или местности (ЦММ). Такую модель получают посредством геодезического лазерного сканирования, результатом которого является информация о рельефе (местности) в виде облака точек.

Такую интерпретацию информации о местности легко перенести в информационную среду (например, NanoCAD Geonics) и получить тригональную (трехкоординат-

ную) ЦМР (ЦММ). При этом, помимо поверхностной информации о рельефе, в перечень обследования ГТС входят работы по георадарному сканированию грунтов, освидетельствованию (например, посредством методов неразрушающего контроля) железобетонных и металлических конструкций. Так определяются физико-механические свойства грунтов под объектом обследования и геометрические характеристики ландшафта, которые в совокупности формируются объемом геолого-геодезических изысканий, необходимых при создании цифрового двойника объекта гидротехнического назначения.

С помощью лазерных технологий сканирования также получают непосредственно и сам обследуемый объект – гидротехническое сооружение (в том числе с применением беспилотных летательных аппаратов). Внешний вид ГТС позволяет получать результаты о техническом состоянии объекта при визуальном обследовании, а информационная модель объекта, полученная в результате сканирования, позволит выявить все внешние отклонения от его первоначального облика для последующего ремонта или реконструкции [6].

При таком подходе накапливается достаточно много информации – материала, который в дальнейшем должен быть правильно верифицирован и использован. Например, все конструктивные элементы ГТС в мелиоративном хозяйстве состоят из насыпного (намывного, утрамбованного) грунта, реже – из железобетонных, деревянных или металлических конструкций. Конструктивные особенности той или иной плотины в системе мелиорации земель определяются рельефом местности, залегающими грунтами, возможностями фильтрации этих грунтов и другими гидрофизическими свойствами почв. При объединении полученной информации в ходе инженерных изысканий по грунтам с трехмерной моделью самого ГТС (так называемой посадки объекта капитального строительства на местность) появляются возможности оценки несущей способности грунтов по отношению к обследуемому объекту [7].

При обследовании ГТС применяются визуальные методы и инструментальные (с использованием инструментов, принцип действия которых основан на прямом или косвенном физическом воздействии с их помощью с последующим анализом результатов их работы). Так, например, различный характер разрушения откосов ГТС (бетонных или грунтовых) при обследовании будет указывать на движение грунтового основания объекта, на деформации

как в теле (объеме) объекта, так и в сопрягаемых с ним конструкциях (металлических опорах, поручнях, навесах и др.) [6].

При моделировании поведения цифрового двойника на виртуальной местности с помощью систем автоматизированного проектирования, которые учитывают все информационно-материальные характеристики грунтов и объекта капитального строительства, получаем информацию о возможных в будущем поверхностных и внутренних повреждениях, которые и будут определять результаты эксплуатации объекта в его жизненном цикле. Время эксплуатации объектов гидротехнического назначения определяется в соответствии с [8]. Концепция BIM-моделирования позволяет продлить данный срок ввиду получения и анализа различных результатов расчетов совмещенных процессов, которые связаны между собой и влияют на срок службы сооружения.

При обследовании ГТС необходимо уделить особое внимание верификации полученных данных об объекте капитального строительства. Обследование, будь то визуальное или инструментальное, следует проводить по методике, которая устанавливает строгий порядок и последовательность необходимых измерений с помощью конкретных инструментов, с возможностью применения дублирующих инструментов для верификации общих результатов, полученных в процессе обследования объекта и создания его цифрового двойника.

Алгоритмизация последовательности проводимых при обследовании ГТС работ ложится в основу будущей цифровой модели объекта гидротехнического назначения, которая в дальнейшем будет подвергнута прочностным расчетам грунтов и оснований, оптимизации топологии самого объекта капитального строительства, анализу и верификации полученных данных. Весь этот объем работ с цифровым двойником ГТС предоставит возможность качественно выполнить работы по его ремонту или реконструкции [9].

Результаты исследования и их обсуждение

Методология обследования ГТС на предмет его технического состояния и разработки декларации безопасности объекта гидротехнического назначения должна быть безусловно комплексной. Такая методология представляет собой перечень мероприятий, включающий в себя как визуальные, так и инструментальные методы получения информации о ГТС при обследовании. При этом инструментальное обследование

ГТС позволит получать информацию, которую визуальные методы обследования предоставить не могут: прочность бетонных поверхностей (откосов) и причины их разрушения; толщина защитного слоя бетона, степень коррозии армирующей сетки каркаса железобетонных конструкций и др. [10].

Во всех мероприятиях, проводимых при обследовании ГТС, определенную помощь могут оказывать технологии информационного моделирования – BIM-технологии. Опишем наиболее важные мероприятия при обследовании объектов гидротехнического назначения во взаимосвязи с возможностями BIM-технологий по порядку их проведения.

Первый этап. Гидрогеологические и геодезические изыскания (определение залегания грунтовых вод, лазерное поверхностное сканирование местности и объекта обследования, лабораторные исследования проб грунтов из-под объекта гидротехнического назначения и прилегающих территорий, георадарное сканирование грунтов и др.).

На рисунке 1 показаны результат обработки ЦМР и интеграция объекта гидротехнического назначения в облако точек ЦМР,

разбитое сеткой из конечных элементов. Как видно из рисунка 1, сеткой конечных элементов на первом этапе для расчетного анализа разбивается только рельеф местности, а сам объект обследования – ГТС (грунтовая плотина и железобетонный блок с металлическими затворами) – остается в виде нагрузки, действующей на грунт, и в расчет не принимается. Он будет рассчитываться на следующем этапе.

Полученная в результате изысканий информация используется и анализируется в средах программных комплексов технологий информационного моделирования для создания цифровой модели местности, цифрового двойника ГТС, определения взаимодействия объекта гидротехнического назначения с обследуемыми грунтами, выявления причин разрушения конструкций в зависимости от деформации грунтов и положения уровня грунтовых вод. Полученные результаты изысканий консолидируются (обобщаются) с помощью различных систем автоматизированного проектирования и расчетов (САПР), которые призваны взаимодействовать с информационными средами BIM-технологий [11].

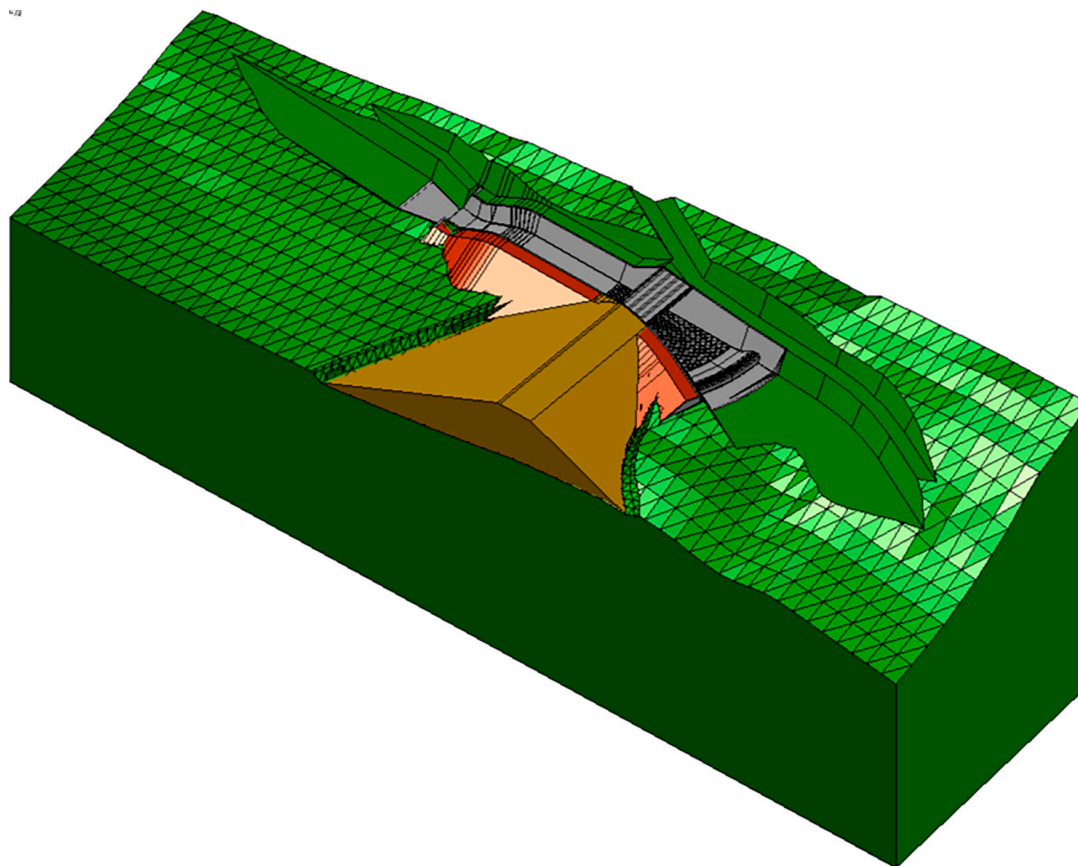


Рис. 1. Цифровая модель местности (рельефа) с гидротехническим сооружением
Источник: составлено автором

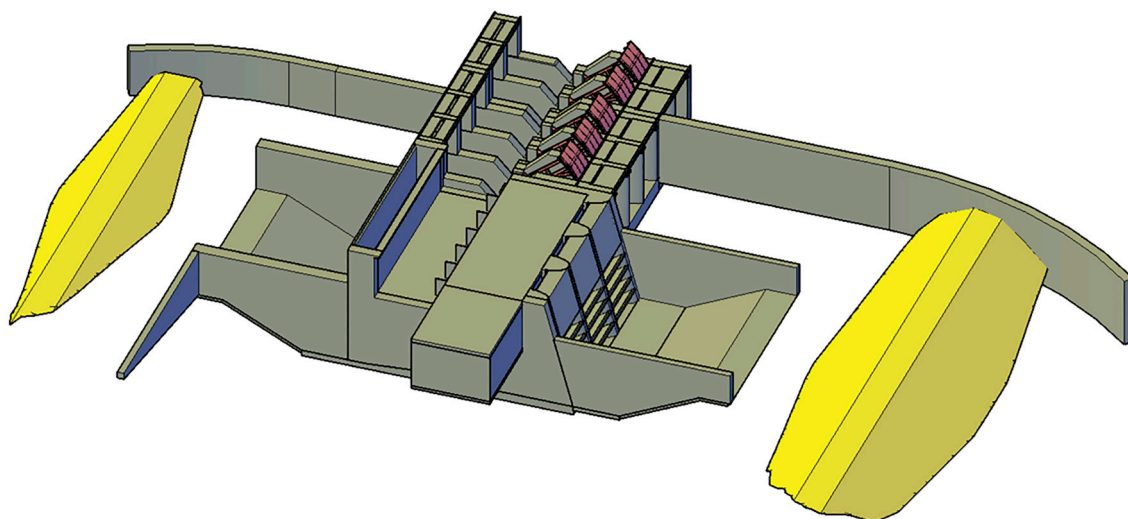


Рис. 2. Цифровой двойник гидротехнического сооружения
Источник: составлено автором

Второй этап. Визуальное обследование объекта гидротехнического назначения (измерение параметров обнаруженных повреждений при надводном и подводном визуальном осмотрах). После комплекса таких мероприятий полученная информация дополняет разработанную на первом этапе цифровую модель объекта обследования с указанием на ней мест различных повреждений, зафиксированных при визуальном осмотре. В дальнейшем она будет отражать характер деформаций и грунта, и самого объекта, а также выявлять причины обнаруженных при визуальном обследовании ГТС повреждений. На рисунке 2 представлен цифровой двойник гидротехнического сооружения с элементами цифровой модели местности.

Третий этап. Инструментальное обследование ГТС (оценка прочности бетонных конструкций методами неразрушающего контроля; определение остаточной толщины металлических конструкций; шурфование в контрольных точках для описания сечений конструкций и др.). Результаты обследования с применением BIM-технологий представляют собой аналитические данные, которые получают после расчетных мероприятий на прочность, устойчивость железобетонных и металлических конструкций, определения деформаций в теле насыпной плотины и ее железобетонных (металлических) элементов. Такие аналитико-расчетные мероприятия позволяют обосновать получаемые разрушения на объектах гидротехнического назначения и разработать мероприятия по их предотвращению в жизненном цикле объекта [12].

Четвертый этап. Совмещенные расчеты по цифровому двойнику объекта обследования и грунта, на котором он располагается, с учетом результатов натурного обследования (расчеты фильтрационно-напряженно-деформируемого состояния грунтовой плотины с верификацией полученных данных от пьезометрии грунтов и объекта обследования, совмещенные расчеты деформаций ГТС в зависимости от пьезометрии грунтов и др.). На этом завершающем этапе работ, связанных с анализом всевозможных данных, полученных при обследовании ГТС, проводится интеграция полученной информации в цифровую модель местности и объекта обследования, после чего выполняются их консолидация и различные совмещенные расчеты. Результаты расчетов позволяют сделать выводы о настоящем состоянии ГТС и выявить его прогрессирующее состояние в жизненном цикле. Окончательные результаты обследования ГТС с применением информационного моделирования также дают возможность организовывать и проводить проектные работы по реконструкции объекта с учетом всех результатов его обследования. Соответственно, таким способом продлевается жизненный цикл объекта гидротехнического назначения, его эксплуатация становится безопасной и эффективной.

Безопасная эксплуатация гидротехнических сооружений связана, прежде всего, с природными и техногенными факторами. Изменение рельефа местности приводит ГТС в нестабильное состояние: происходят процессы разрушения откосов, железобетонных и металлических конструкций обь-

ектов гидротехнического назначения и др. Обследование объектов гидротехнического назначения с использованием возможностей BIM-технологий позволяет эффективно моделировать поведение объекта на протяжении его жизненного цикла, выявлять прогрессирующие разрушения его конструкций и элементов, устранять их и препятствовать их повторному появлению. Современные возможности BIM-технологий дают возможность эффективно в режиме реального времени моделировать различные ситуации с объектами капитального строительства и находить выходы из самых сложных природных и техногенных ситуаций.

Заключение

В процессе проведения настоящего исследования сформулирована и сформирована методология применения возможностей BIM-технологий при сопровождении визуального и инструментального обследования гидротехнических сооружений. Разработаны подходы к использованию различных систем автоматизированного проектирования и расчетов объектов гидротехнического назначения при проведении мероприятий по их обследованию. Обозначены основные производители и программные комплексы для моделирования технологических процессов в гидротехническом строительстве, которые могут быть применены в концепции BIM-моделирования при обследовании объектов подобного рода. Описаны этапы использования информационного моделирования на различных стадиях обстреливания объектов гидротехнического назначения с учетом как рельефа, на котором располагается объект обследования, так и состояния самого гидротехнического сооружения. Установлена функциональная связь между работами по обследованию ГТС, полученной в результате этих работ информацией и интеграцией ее в среды различных систем автоматизированного проектирования и расчетов для анализа данных и выработки конечных рекомендаций. Определено, что безопасная эксплуатация гидротехнических сооружений достигается за счет эффективного обследования объектов с применением BIM-технологий. Показаны

примеры интеграции данных, полученных с помощью лазерного сканирования рельефа и расположенного на нем гидротехнического сооружения, в цифровую модель местности с цифровым двойником ГТС.

Список литературы

1. Косиченко Ю.М., Баев О.А. Гидротехнические сооружения: учебное пособие. Новочеркасск, 2018. 207 с.
2. Рассказов Л.Н., Орехов В.Г., Анискин Н.А., Малаханов В.В., Бестужева А.С., Саинов М.П., Солдатов П.В., Толстиков В.В. Гидротехнические сооружения. Часть 1: учебник для вузов. Издание второе, исправленное и дополненное. М.: АСВ, 2011. 536 с.
3. Талапов В.В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. М.: ДМК Пресс, 2011. 392 с.
4. Бабчук В., Шилова Л., Евстратов В. Использование технологий информационного моделирования в гидроэнергетическом строительстве // Энергетическая политика. 2022. № 10 (176). С. 66-73. DOI: 10.46920/2409-5516_2022_10176_66.
5. Методические рекомендации по осуществлению федерального государственного строительного надзора при строительстве и реконструкции гидротехнических сооружений объектов электроэнергетики // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. 18.05.2017. 167 с.
6. Качаев А.Е., Турапин С.С. Особенности реконструкции земляных плотин мелиоративных систем // Наука и мир. 2024. № 3. С. 6-10. DOI: 10.26526/2307-9401-2024-3-6-10.
7. Качаев А.Е. К вопросу разработки комплексных расчетных моделей грунтовых плотин мелиоративных систем для их численного моделирования // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков (шифр-МКРНИП): Сборник материалов XXXIII международной научно-практической конференции, Москва, 16 декабря 2024 года. М.: АНО ДПО Центр развития образования и науки, 2024. С. 278-284. DOI: 10.26118/4476.2024.20.22.007.
8. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» от 21.07.1997 N 117-ФЗ. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/11222> (дата обращения: 05.03.2025).
9. Качаев А.Е. Критерии эффективности при реконструкции грунтовых плотин // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков (шифр-МКРНИП): сборник материалов XXXIII международной научно-практической конференции, Москва, 16 декабря 2024 года. М.: АНО ДПО Центр развития образования и науки, 2024. С. 285-291. DOI: 10.26118/6364.2024.18.47.008.
10. Hasan H., Naimi S., Hameed M.M. A Comprehensive Analysis of BIM Technology's Critical Role in Assessing Cost for Complex Dam Construction Projects // Math. Model. Eng. Probl. 2023. № 10. P. 767-773. DOI: 10.18280/mmp.100305.
11. Zhang Z., Zhang S., Zhao Z., Yan L., Wang C., Liu H. HydroBIM—Digital design, intelligent construction, and smart operation // J. Intell. Constr. 2023. Vol. 1. P. 9180014.
12. Nawari N. BIM Data Exchange Standard for Hydro-Supported Structures // J. Archit. Eng. 2019. Vol. 25. Is. 3. P. 04019015. DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000360.