

УДК 626-315.3

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ, КАК
ОДИН ИЗ ВАЖНЕЙШИХ РАСЧЕТОВ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ
ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

Качаев Александр Евгеньевич,
канд. техн. наук, научный сотрудник,
ФГБНУ ВНИИ «Радуга»

Аннотация: В статье рассматривается задача, с помощью которой можно моделировать фильтрацию через грунтовую плотину, посредством программных комплектов систем автоматизированного проектирования. Такая задача является одной из немногих, которые позволяют вычислять параметры напряженно-деформированного состояния и фильтрации гидротехнических сооружений в рамках концепции BIM-моделирования. При проектировании объектов гидротехнических сооружений фильтрация является одним из важнейших параметров, который определяет дальнейшие условия эксплуатации объекта капитального строительства. В исследовании в рамках концепции BIM-моделирования представлен пример и результат расчета фильтрации через грунтовую плотину в различных временных периодах.

Ключевые слова: плотина, гидротехническое сооружение, грунт, фильтрация, напряженно-деформированное состояние, совмещенный расчет

**DETERMINING THE FILTRATION OF AN EARTH DAM AS ONE OF
THE MOST IMPORTANT CALCULATIONS BIM- TECHNOLOGIES
FOR HYDRAULIC STRUCTURES**

Kachaev Alexander Evgenievich,
PhD, research fellow, Federal State Budgetary
Scientific Institution All-Russian Research Institute "Raduga"

Abstract: The article considers a problem that can be used to model filtration through an earth dam using CAD software packages. This problem is one of the few that allow calculating the parameters of the stress-strain state and filtration of hydraulic structures within the framework of the BIM modeling concept. When designing hydraulic structures, filtration is one of the most important parameters that determines the further operating conditions of the capital construction project. The study, within the framework of the BIM modeling concept, presents an example and the result of calculating filtration through an earth dam in different time periods.

Keywords: dam, hydraulic structure, soil, filtration, stress-strain state, combined calculation

Введение. Для расчетов установившейся фильтрации разработаны различные методы, как аналитические, так и графоаналитические. Аналитические методы позволяют получить точные решения для простых случаев однородного основания и тела плотины. Графоаналитические методы, в частности метод гидравлической сетки, дают возможность решать задачи для более сложных условий, включая неоднородность грунтов и наличие дренажных устройств. Все эти методы активно используются в программных комплексах расчетов гидротехнических сооружений (ГТС), а также являются неотъемлемой частью технологий BIM-моделирования (проектирования) [1, 2].

При расчете фильтрационной прочности определяются градиенты напора в различных точках тела плотины и основания. Расчет общей устойчивости откосов плотины требует расчета величины порового давления, которое определяется на основе результатов фильтрационного расчета. совмещенный расчет порового давления и фильтрации позволяет получать достоверные результаты о нагружении и эксплуатации плотины [3].

Конструктивные элементы плотины, такие как дренажи и обратные фильтры, проектируются на основе данных о расходе фильтрационной воды

и ее напоре. Правильно спроектированный дренаж обеспечивает снижение фильтрационного давления и предотвращает вынос грунта[4].

Несмотря на приближенный характер исходных данных, фильтрационные расчеты необходимы для оценки устойчивости и безопасности земляных плотин. Они позволяют определить величину фильтрационного расхода, гидростатическое давление на основание и тело плотины, а также положение кривой депрессии. Эти параметры, в свою очередь, используются для проектирования дренажных систем, предотвращающих возникновение аварийных ситуаций [5].

При выборе метода фильтрационного расчета следует учитывать геологические условия, геометрические размеры плотины и требуемую точность результатов. В сложных случаях, когда простые методы не дают надежных результатов, рекомендуется использовать численные методы, реализованные в специализированных программных комплексах.

Важно помнить, что фильтрационные расчеты являются лишь одним из этапов проектирования земляных плотин. Наряду с ними необходимо проводить инженерно-геологические изыскания, лабораторные испытания грунтов и другие виды исследований, обеспечивающие надежность и долговечность сооружения [6].

Целью научного исследования является моделирование фильтрации через грунтовую плотину и отработка одной из немногих возможностей BIM-моделирования для создания информационной модели гидротехнического сооружения с учетом его фильтрационной способности.

Постановка задачи и методы исследования.

На рис. 1 показана грунтовая плотина с геометрическими размерами.

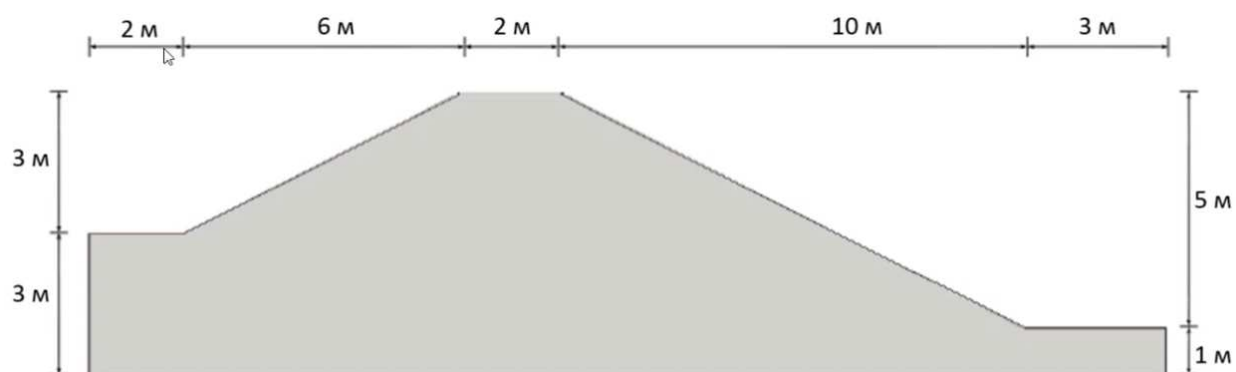


Рис. 1 Расчетная схема грунтовой плотины

В качестве метода исследования выбран графоаналитический метод. Графоаналитический метод исследования для подобного рода задач позволяет получать достоверные результаты, как с возможностями САПР так и при ручном, аналитическом расчете. Большинство программных комплексов, используемых при ВМ-моделировании, имеют в своей основе именно этот метод исследования.

В постановке задачи очень важно отработать моделирование фильтрационных процессов через плотину с помощью систем автоматизированного проектирования (САПР). В технологиях ВМ-моделирования такая задача позволяет выполнять совмещенные расчеты с их напряженно-деформированным состоянием.

Исходные данные задачи. Поток идет слева со стороны реки на право к польдеру. В результате с правой стороны дамбы имеется зона высачивания. Положение депрессионного уровня зависит от изменяющегося уровня воды в реке. Ширина дамбы по гребню составляет 2 м. Первоначальная глубина воды в реке 1,5 м. Перепад между уровнем воды в реке и уровнем польдера 3,5 м.

Для материала грунта – песка – используется линейно-упругая модель, так как в этой задаче рассматривается решение только фильтрационной задачи. Для материала грунта важно знать физические, механические и фильтрационные параметры. Внутренняя часть глобального уровня является исходной информацией, а ее реальное положение будет определяться в ходе

фильтрационного расчета, результатом которого станет кривая депрессии. Глобальный уровень по исследуемой плотине показан на рис. 2.

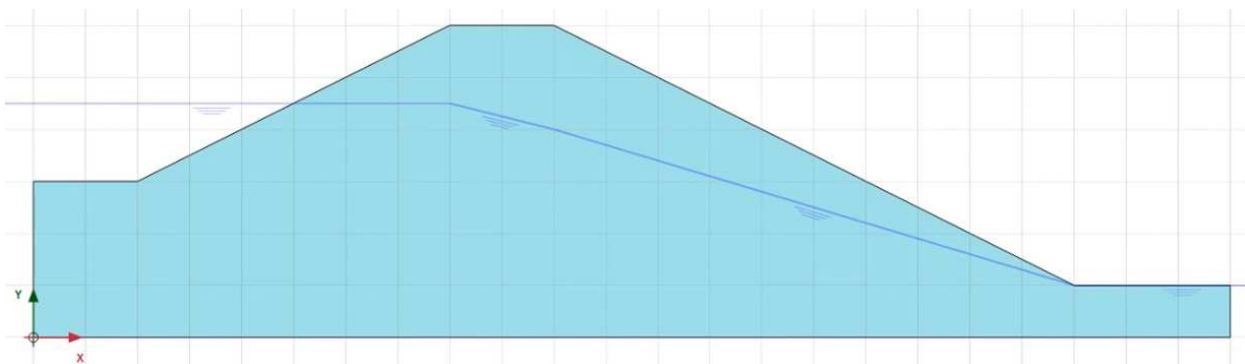


Рис. 2. Глобальный уровень воды по результатам исходных данных задачи.

На начальной фазе проводится расчет установившейся фильтрации при среднем уровне воды в реке (3,5 м). На первой фазе происходит расчет нестационарной фильтрации при гармоническом изменении уровня воды в течение 1 суток. На второй фазе производятся такие же расчеты, как и на первой фазе, только для более продолжительного периода в 10 суток.

Напор грунтовых вод будет определять кривую депрессии, которая показана на рис. 3. Аналогичная картина будет наблюдаться и всех остальных фаз [7].

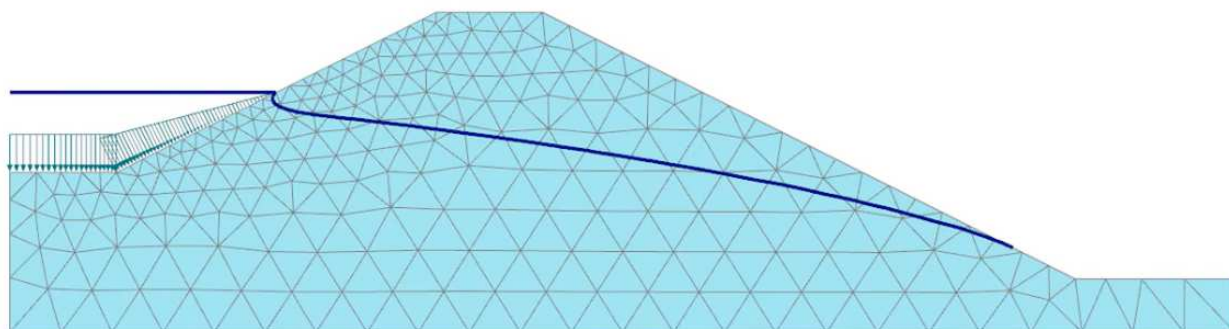


Рис. 3 Изменение напора грунтовых вод на начальном этапе

Для плоской расчетной модели плотины выбраны треугольные конечные элементы [8].

Основная часть. Полученные результаты расчетов фильтрации грунтовой плотины, конструкция которой рассмотрена в исследовании, представлены на рис. 4-7. Результаты расчета представляют собой значения

фильтрации при различных уровнях реки и длительности процесса фильтрации.

На рис. 4 показана кривая депрессии и параметры фильтрации на начальном этапе исследования при среднем уровне воды в реке 3,5 м. Важно отметить, что границы вертикалей фильтрационной активности грунтов адекватно соотносятся с нисходящей кривой депрессии, а, следовательно, и с поровым давлением внутри плотины. Параметр фильтрационной способности в русле реки равен 4,4 м, в зоне польдера – не превышает 1,7 м.

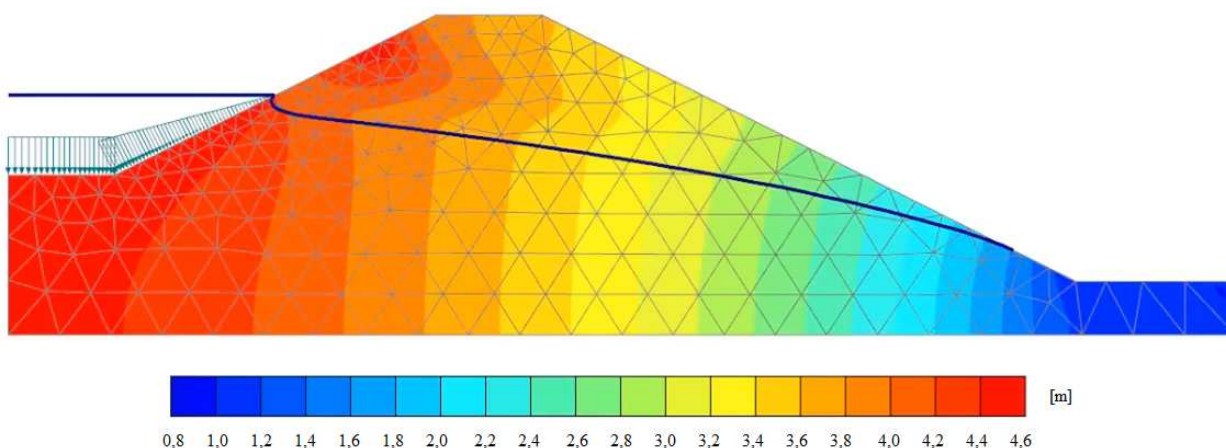


Рис. 4 Изменение напора в результате установившегося уровня воды в реке
(на начальном этапе)

На рис. 5 показана кривая депрессии и параметры фильтрации грунтовой плотины, моделируемой в рассматриваемой задаче при максимальном уровне воды в реке – 4,5 м. Отметим, что в зоне контакта воды с откосом плотины наблюдаются показатели фильтрации ниже, чем в рассматриваемом ранее (на рис. 4) случае. Это связано с тем, что площадь контакта увеличивается, а горизонтальная составляющая фильтрации уменьшается. Это говорит об адекватности помученной численной модели расчета процесса фильтрации через грунтовую плотину. Здесь важно заметить, что кривая депрессии при подъеме уровня воды в реке, или его опускании может иметь графические разрывы, это значит, что процесс фильтрации будет нестационарным.

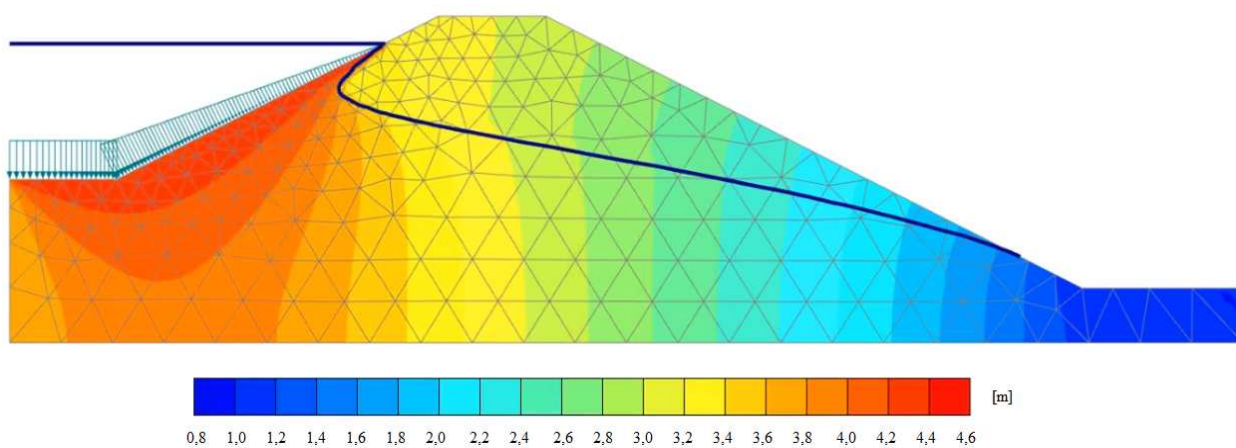


Рис. 5 Изменение напора в результате неустановившегося уровня воды в реке (при максимальном уровне воды – 4,5 м)

Из рис. 6, по аналогии с рис. 4-5, можно сделать выводы, что в связи со снижением уровня воды в реке до 3,5 м наблюдается снижение параметра фильтрации грунтовой плотины (уменьшится до максимального значения равного 4,1м). данное явление также адекватно соответствует процессу фильтрации воды через однородный грунт (условно в задаче выбран песок). Границы вертикалей фильтрации ярко выражены и связаны с нормальной динамикой движения воды в толще плотины.

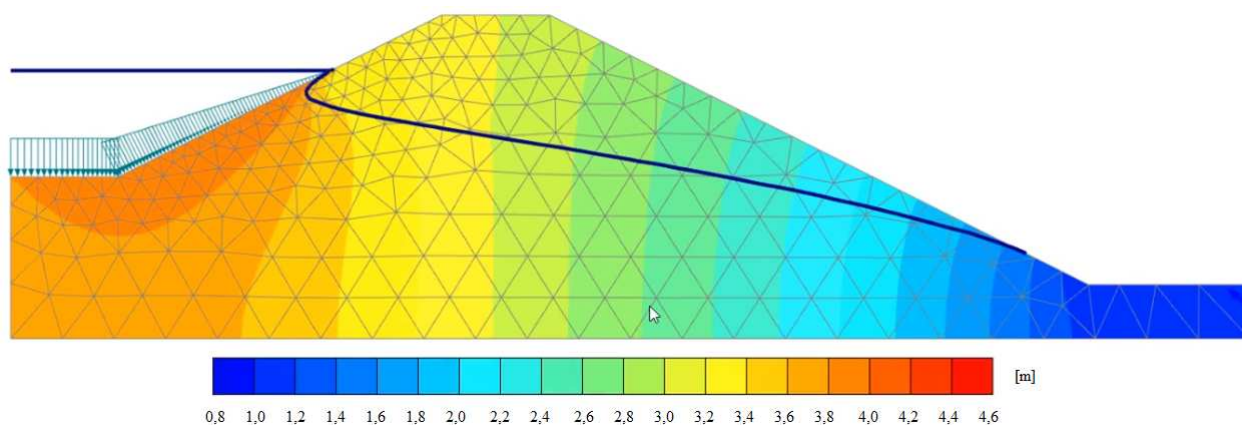


Рис. 6 Изменение напора в результате гармонических колебаний (неустановившегося) уровня воды в реке (при среднем уровне воды - 3,5 м)

Минимальный уровень воды в реке и результаты расчета фильтрации для поставленной задачи представлены на рис. 7. Здесь в реке приведен минимальный уровень воды – 1,5 м, при котором фильтрация максимально замедляется. На результате численного моделирования наблюдается две зоны: над кривой депрессии, где остаточная фильтрация больше (3,85 м), чем

в зоне под кривой депрессии (2,85 м). Это связано частичным движением воды при понижении общего уровня в реке до минимального значения. Кривая депрессии при этом уже не имеет нестационарности, а представляет собой параболу, что говорит о нормальном распределении фильтрующейся жидкости в объеме плотины. Таким образом, можно заключить, что при минимальном уровне воды в реке наблюдается стабилизация процесса фильтрации в средней части грунтовой плотины, представленной к расчету. Здесь среднее значение фильтрации составляет 3,3 м.

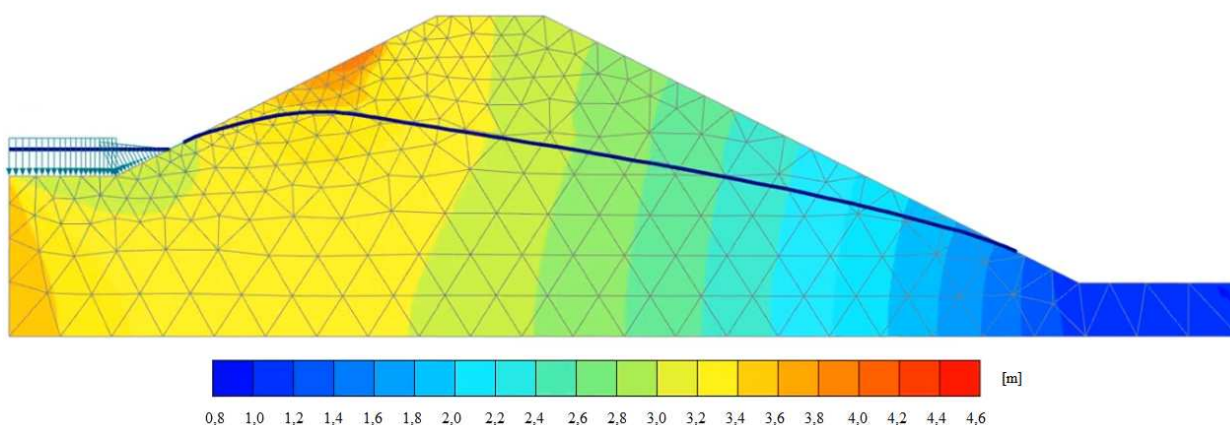


Рис. 7 Изменение напора в результате гармонических колебаний уровня воды в реке (при уровне воды - 1,5 м)

ВМ-технологии для гидротехнического строительства в зависимости от задач, которые необходимо решать при проектировании, позволяют разрабатывать и использовать различные численные модели объектов. Анализ этих моделей позволяет принимать решения по конструктивному исполнению подобного рода сооружений. Расчет фильтрации для плотин различной конструкции является одним из важнейших и целиком, и полностью может быть совмещен с одновременным расчетом напряженно-деформированного состояния гидротехнического объекта.

Заключение. Расчет фильтрации является обязательной процедурой при проектировании плотин различного типа. Результаты расчета фильтрационной способности объектов гидротехнического строительства

после их аналитического исследования должны быть в обязательном порядке использованы на всех стадиях проектирования объектов подобного рода.

Поставленная и решенная в научном исследовании задача с условной грунтовой плотиной и различным уровнем воды в реке показала, что динамика фильтрации через плотину при максимальном и минимальном показателях уровня воды в реке дает возможность адекватно проектировать гребень плотины, его откосы, выбирать материал для насыпи и необходимую отсыпку. Отработка поставленной задачи для грунтовой плотины устанавливает рекомендации ко всем возможным особенностям проектирования объекта гидротехнического сооружения. а также результаты расчетов могут быть использованы при разработке проектов по реконструкции и сносу сооружений данного типа.

Список источников

1. Талапов В.В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. - Москва: ДМК Пресс, 2011. - 392 с.
2. Сидоренко Д. А., Качаев А. Е. BIM-технологии в строительстве: что будет дальше? // Новые технологии в учебном процессе и производстве: Материалы XXI Международной научно-технической конференции, посвящённой 35-летию полета орбитального корабля-ракетоплана многоразовой транспортной космической системы "Буран", Рязань, 12–14 апреля 2023 года / Под редакцией А.Н. Паршина. – Рязань: Рязанский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Московский политехнический университет", 2023. – С. 490-492.
3. Турапин С. С. Методические рекомендации по правилам эксплуатации мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений / С. С. Турапин, Г. В. Ольгаренко. – Коломна: ИП Воробьев О.М., 2015. – 68 с.

4. 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.
5. Качаев, А. Е. Методика численного моделирования устойчивости грунтовой плотины при экстренной сработке водохранилища // Экология и строительство. – 2024. – № 4. – С. 4-13. – DOI 10.35688/2413-8452-2024-04-001.
6. Качаев А. Е., Турапин С. С. Обоснование необходимости разработки комплексных расчетных моделей грунтовых плотин мелиоративных систем // Наука и мир. – 2024. – № 3. – С. 1-5. – DOI 10.26526/2307-9401-2024-3-1-5.
7. Качаев, А. Е. Определение крутизны волноустойчивого неукрепленного откоса плотин из песчаного грунта // Наука и мир. – 2024. – № 4. – С. 1-5. – DOI 10.26526/2307-9401-2024-4-1-5.
8. Мозголов М. В., Брыль С. В., Козлова Е. В. О влиянии балки опорного контура на напряженно-деформированное состояние балок прямых кессонных железобетонных перекрытий // Системные технологии. – 2022. – № 2(43). – С. 31-40. – DOI 10.55287/22275398_2022_2_31.
9. Анискин Н.А. Неустановившаяся фильтрация в грунтовых плотинах и основаниях // Вестник МГСУ. 2009. № 2. С. 70–79.
10. Брыль С. В. К вопросу о создании цифровой информационной модели отдельно расположенных объектов гидромелиоративных систем // Наука. Исследования. Практика: Сборник избранных статей по материалам Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 25 июня 2022 года. – Санкт-Петербург: Частное научно-образовательное учреждение дополнительного профессионального образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ», 2022. – С. 54-57. – DOI 10.37539/SRP303.2022.81.62.012.

11. Брыль С. В. К вопросу о цифровом моделировании мелиоративных объектов // InternationalAgriculturalJournal. – 2021. – Т. 64, № 6. – DOI 10.24412/2588-0209-2021-10440.
12. СП 333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла». – Минстрой России. 2020. - 219 с.

References

1. Talapov V. V. BIM Basics: Introduction to Building Information Modeling. - Moscow: DMK Press, 2011. 392 p.
2. Sidorenko D. A., Kachaev A. E. BIM technologies in construction: what will happen next? // New technologies in the educational process and production: Proceedings of the XXI International scientific and technical conference dedicated to the 35th anniversary of the flight of the orbital rocket plane of the reusable transport space system "Buran", Ryazan, April 12-14, 2023 / Edited by A. N. Parshin. - Ryazan: Ryazan Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow Polytechnic University", 2023. Pp. 490-492.
3. Turapin S. S. Methodological recommendations on the rules for the operation of melioration systems and separately located hydraulic structures / S. S. Turapin, G. V. Olgarenko. - Kolomna: IP Vorobyov O. M., 2015. 68 p.
4. Kachaev A. E., Turapin S. S. Features of reconstruction of earthen dams of melioration systems // Science and the World. 2024. No. 3. Pp. 6-10. - DOI 10.26526/2307-9401-2024-3-6-10.
5. Kachaev A. E. Methodology for numerical modeling of the stability of an earth dam during emergency drawdown of a reservoir // Ecology and Construction. 2024. No. 4. Pp. 4-13. – DOI 10.35688/2413-8452-2024-04-001.

6. Kachaev A. E., Turapin S. S. Justification of the need to develop complex calculation models of earth dams of land reclamation systems // Science and the World. 2024. No. 3. Pp. 1-5. – DOI 10.26526/2307-9401-2024-3-1-5.
7. Kachaev, A. E. Determination of the steepness of a wave-resistant unreinforced slope of dams made of sandy soil // Science and the World. 2024. No. 4. Pp. 1-5. – DOI 10.26526/2307-9401-2024-4-1-5.
8. Mozgolov M. V., Bryl S. V., Kozlova E. V. On the influence of the support contour beam on the stress-strain state of beams of straight caisson reinforced concrete floors // System technologies. 2022. No. 2(43). Pp. 31-40. – DOI 10.55287/22275398_2022_2_31.
9. Aniskina N. A. Unsteady filtration in earth dams and foundations // Bulletin of MGSU. 2009. No. 2. Pp. 70–79.
10. Bryl S. V. On the issue of creating a digital information model of separately located objects of irrigation and drainage systems // Science. Research. Practice: Collection of selected articles based on the materials of the International Scientific Conference, St. Petersburg, June 25, 2022. - St. Petersburg: Private Scientific and Educational Institution of Continuing Professional Education Humanitarian National Research Institute "NATSRZAVITIE", 2022. - Pp. 54-57. - DOI 10.37539 / SRP303.2022.81.62.012.
11. Bryl S. V. On the issue of digital modeling of reclamation objects // International Agricultural Journal. 2021. Vol. 64, No. 6. - DOI 10.24412/2588-0209-2021-10440.
12. SP 333.1325800.2020 "Information modeling in construction. Rules for the formation of an information model of objects at various stages of the life cycle." - Ministry of Construction of Russia. 2020. - 219 p.