

ПЛАН ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБСЛЕДОВАНИЯ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ III-IV КЛАССА ОПАСНОСТИ

Качаев А.Е., Медведева А.А., Гарголина К.В., Лесников И.Р.

*Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и
сельхозводоснабжения «Радуга», Коломна, Россия*

Ключевые слова: планирование эксперимента, гидротехническое сооружение, плотина, факторный дизайн, риск-ориентированное обследование.

Аннотация. В исследовании предложена концепция дизайна эксперимента для обследования грунтовой плотины III-IV класса опасности, ориентированная на интеграцию геотехнических, гидравлических и эксплуатационных показателей. План позволяет определить оптимальный набор индикаторов, методов наблюдения и частоты обследований через последовательные фазы: скрининг факторов, моделирование откликов и валидационные испытания. Ожидается улучшение точности прогнозирования деформаций и устойчивости, сокращение затрат и повышение скорости принятия управленческих решений в эксплуатации. Результаты применимы для регламентов обследований и ресурсного планирования на региональном и федеральном уровне.

EXPERIMENTAL PLAN FOR PROCESSING THE RESULTS OF A SURVEY OF AN EARTH DAM OF HAZARD CLASS III-IV

Kachaev A.E., Medvedeva A.A., Gargolina K.V., Lesnikov I.R.

*All-Russian Research Institute of Irrigation Systems and Agricultural Water Supply
“Raduga”, Kolomna, Russia*

Keywords: experimental design, hydraulic structure, dam, factorial design, risk-based survey.

Abstract. The study proposes an experimental design concept for inspecting a Class III-IV hazard earth dam, focusing on integrating geotechnical, hydraulic, and operational indicators. The plan enables the optimal set of indicators, observation methods, and inspection frequency to be determined through successive phases: factor screening, response modeling, and validation testing. This is expected to improve the accuracy of deformation and stability predictions, reduce costs, and speed up management decision-making during operation. The results are applicable to inspection regulations and resource planning at the regional and federal levels.

Введение. Обследование грунтовых плотин III-IV класса опасности требует не только выбора методик, но и рационального планирования испытаний для определения эффективного набора индикаторов и режимов наблюдений. Применение принципов планирования эксперимента позволяет оптимизировать затраты, повысить достоверность оценки состояния и снизить риск аварий и простоев [1, 2].

Рациональный дизайн эксперимента обеспечивает выбор оптимальных комбинаций методов обследования и частот мониторинга, минимизацию ошибок измерения, а также поддержку решений по ремонту и модернизации на основе надежной статистической базы [3].

Нормативные источники охватывают требования к мониторингу, ограничения по частоте обследований и набор индикаторов безопасности [4]. В рамках данного раздела приводятся обобщенные подходы к обследованию плотин III-IV классов и указания на необходимость интеграции геотехнических, гидравлических и эксплуатационных показателей.

Целью работы является формулировка и обоснование концепции дизайна эксперимента для обследования грунтовой плотины III-IV класса опасности, чтобы выявить ключевые факторы, определить оптимальные комбинации методов и частоты наблюдений, а также получить устойчивые модели состояния плотины и пороговые значения для принятия управленческих решений.

Методы исследования. В основе подхода лежит дизайн эксперимент (DoE – Design of Experiments) с поэтапной реализацией: скрининг факторов, моделирование откликов и валидация. Используется сочетание полевых испытаний, дистанционных и лабораторных методов исследования (табл. 1).

Табл. 1. Факторы и уровни для дизайна эксперимента по обследованию грунтовой плотины III-IV класса опасности

Фактор	Описание	Уровни (примерные значения)	Примечания
Частота обследований	Как часто выполняются наблюдения и измерения	1) Низкая (раз в год); 2) Средняя (раз в полгода); 3) Высокая (раз в три месяца)	Можно адаптировать под регламент и риск-профиль плотины
Тип наблюдения	Основной подход к сбору данных	1) Визуальный осмотр; 2) Геофизические методы; 3) Комбинированный мониторинг (визуал + геофизика)	Разные комбинации дают разные информационные окна
Методы контроля грунтов основания	Типы испытаний/измерений грунтов	1) Неразрушающий контроль деформаций; 2) Геотехнические испытания; 3) Буровые работы и лабораторные анализы	Включает как полевые, так и лабораторные элементы
Временные окна наблюдений	Сезонность или интервалы времени наблюдений	1) Весна; 2) Лето; 3) Осень; 4) Зима	Учет сезонных влияний на параметры (влажность, температура)
Использование дистанционных данных	Применение данных дистанционного мониторинга	1) Нет; 2) Да (спутники, дроны, радар)	Влияние на частоту и охват мониторинга
Уровни гидрогеологической/сейсмической нагрузки	Риск-наклон плотины под воздействиями	1) Низкий; 2) Средний; 3) Высокий	Определяет пороговые значения и ответы по управлению риском

Этапы дизайна эксперимента.

1. Уточнение целей, выбор индикаторов и границ эксперимента, определение бюджета обследования и рамок безопасности.

2. Применение факторного дизайна 2-уровневого типа (частично-фракционное 2^{k-p}) для выявления ключевых факторов, влияющих на функции отклика (осадка, поровое давление, перемещение и др.).

3. Переход к плану Central Composite Design для количественных факторов, чтобы изучить нелинейности и взаимодействия факторов между собой.

4. Проведение верификационных испытаний на другом участке плотины, проверка устойчивости моделей в программных комплексах.

5. Проведение чувствительного анализа и определение наилучших сочетаний методов.

Методы обработки данных могут быть на основе ANOVA или регрессионного анализа данных. Все работы должны соответствовать требованиям по безопасности и не влиять негативно на состояние плотины; предпочтение отдавать неразрушающим методам [5, 6].

Результаты и обсуждение. Ожидаемые результаты: 1) выявление ключевых факторов, влияющих на состояние грунтовой плотины и на качество обследования; 2) разработка устойчивых моделей зависимости состояния плотины от факторов, включая их взаимодействия; 3) определение оптимального набора методов обследования и частоты наблюдений с учетом затрат; 4) формирование рекомендаций по построению регламентов обследований и планированию ресурсов.

Обсуждение особенностей и использования результатов: 1) предложение гибких схем обследования: адаптивное расписание, основанное на текущих данных о техническом состоянии объекта; 2) рекомендации по интеграции дистанционного мониторинга, геофизических методов и наземных измерений за техническим состоянием объекта; 3) важность учета сезонности и региональных факторов в планировании обследований на техническом объекте; 4) требование к открытым базам данных обследований объекта для повышения воспроизводимости результатов обработки эксперимента.

Выводы. Разработанный план эксперимента в концепции дизайна эксперимента позволяет систематически изучать факторы обследования грунтовой плотины III-IV класса, оптимизировать набор индикаторов и частоту наблюдений, повысить точность оценки состояния и снизить затраты на анализ результатов обследования.

Моделирование откликов и валидационные этапы обеспечивают устойчивость рекомендаций и пригодность для практического применения в любом регионе эксплуатации объекта III-IV класса опасности. Для внедрения данного метода при оценке результатов обследования необходимы обновления нормативной базы и создание единых методик применения данного подхода для плотин III-IV классов опасности.

Список литературы

1. Качаев А.Е., Турапин С.С. Особенности реконструкции земляных плотин мелиоративных систем // Наука и мир. – 2024. – №3. – С. 6-10. – doi.org/10.26526/2307-9401-2024-3-6-10.
2. Lane P.A., Griffiths D.V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2000, vol. 126, no. 5, pp. 443-450.
3. Романович А.А., Уваров В.А., Орехова Т.Н., Качаев А.Е., Харламов Е.В. Механизация транспортных процессов в дорожном строительстве: Учебное пособие. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – 134 с.
4. Jasim M.Abbas, A.Aljanabi Qasim, AliMutinyDiyala Zainab. Slope stability analysis of an earth daM // Journal of Engineering Sciences. 2017, vol. 10, no. 01, pp. 106-117.
5. Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Окушко В.В., Шестаков Ю.Г. Механика взвешенного слоя с полидисперсными частицами в пневмосмесителях непрерывного действия // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – №3. – С. 121-127. – doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-3-121-127.
6. Качаев А.Е., Турапин С.С. Методика численного моделирования устойчивости грунтовой плотины при экстренной сработке водохранилища // Экология и строительство. – 2024. – №4. – С. 4-13. – doi.org/10.35688/2413-8452-2024-04-001.

References

1. Kachaev A.E., Turapin S.S. Features of reconstruction of earth dams of melioration systems // Science and the World. 2024, no. 3, pp. 6-10, doi.org/10.26526/2307-9401-2024-3-6-10.
2. Lane P.A., Griffiths D.V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2000, vol. 126, no. 5, pp. 443-450.
3. Romanovich A.A., Uvarov V.A., Orekhova T.N., Kachaev A.E., Kharlamov E.V. Mechanization of transport processes in road construction: Tutorial. – Belgorod: Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, 2023. – 134 p.
4. Jasim M.Abbas, A.Aljanabi Qasim, AliMutinyDiyala Zainab. Slope stability analysis of an earth daM // Journal of Engineering Sciences. 2017, vol. 10, no. 01, pp. 106-117.
5. Kachaev A.E., Orekhova T.N., Okushko V.V., Shestakov Yu.G. Mechanics of a suspended bed with polydisperse particles in continuous pneumatic mixers // Bulletin of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2020, no. 3, pp. 121-127. doi.org/ 10.34031/2071-7318-2020-5-3-121-127.
6. Kachaev A.E., Turapin S.S. 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.org/10.35688/2413-8452-2024-04-001.

Качаев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, заведующий отделом и старший научный сотрудник отдела эксплуатации гидромелиоративных и гидротехнических сооружений

Kachaev Alexander Evgenievich – candidate of technical sciences, head of the Department and senior researcher in the department of operation of irrigation and hydraulic engineering structures

Медведева Анна Александровна – младший научный сотрудник отдела эксплуатации гидромелиоративных и гидротехнических сооружений	Medvedeva Anna Alexandrovna – junior researcher of the Department of operation of irrigation and hydraulic structures
Гарголина Кристина Витальевна – младший научный сотрудник отдела эксплуатации гидромелиоративных и гидротехнических сооружений	Gargolina Kristina Vitalievna – junior researcher of the Department of operation of irrigation and hydraulic structures
Лесников Иван Романович – младший научный сотрудник отдела эксплуатации гидромелиоративных и гидротехнических сооружений	Lesnikov Ivan Romanovich – junior researcher of the Department of operation of irrigation and hydraulic structures
doctor_cement@mail.ru	

Received 24.02.2026