



УДК 627.824.3.04

doi: 10.55287/22275398_2026_58_128

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОДНОРОДНОЙ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ ПО ДАННЫМ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

А. Е. Качаев
С. С. Турапин

Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», г. Коломна

Аннотация

В исследовании рассматривается комплексный подход к оценке технического состояния однородных грунтовых плотин, основанный на интеграции данных натурных инженерных изысканий и методов математического планирования эксперимента. Авторами предложена методика перехода от трудоемких единичных численных расчетов методом конечных элементов к построению аналитических метамоделей состояния сооружения на основе единичных данных инженерных изысканий. В работе обосновано использование центрального композиционного ротатабельного планирования для аппроксимации зависимости коэффициента устойчивости от физико-механических свойств грунтов и гидрологических нагрузок согласно СП 39.13330.2012. Определены ключевые факторы варьирования и функции отклика, позволяющие ранжировать параметры грунта по степени их влияния на надежность плотины. Результаты исследования позволяют оптимизировать состав инженерных изысканий, выявляя наиболее критические характеристики для мониторинга. Разработанные рекомендации могут быть использованы для оперативного прогнозирования безопасности гидротехнических сооружений при изменении эксплуатационных условий.

Ключевые слова

Плотина, инженерные изыскания, планирование эксперимента, коэффициент устойчивости, гидротехническое сооружение, сцепление грунта.

Дата поступления в редакцию

01.04.2026

Дата принятия к печати

10.04.2026

Введение

В современной практике эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС) проблема оценки безопасности однородных грунтовых плотин остается одной из наиболее острых. Большинство таких объектов в РФ эксплуатируются свыше 40 – 50 лет, что ведет к деградации физико-механических свойств грунтов и изменению фильтрационного режима их работы [1]. Согласно требованиям СП 39.13330.2012, расчеты устойчивости должны основываться на достоверных данных инженерных изыс-

каний¹. Однако высокая вариативность характеристик грунтов создает неопределенность, которую сложно учесть стандартными единичными расчетами. В связи с этим актуальной задачей является разработка методики, объединяющей натурные данные изысканий и математическое планирование эксперимента (МПЭ) для создания быстрых метамоделей прогнозирования состояния плотины. Также это актуально при разработке декларации безопасности для сооружений подобного типа [2].

Вопросы надежности и численного моделирования грунтовых плотин широко освещены в трудах классиков отечественной гидротехники: Н. Рассказова, М. М. Мирсаидова, В. Б. Штильмана, М. П. Саинова и А. Н. Анискина [3–7]. Проблематикой фильтрационной и статической устойчивости откосов насыпных гидротехнических сооружений занимались Н. В. Орнатский и Н. Н. Маслов [8, 9].

В области применения статистических методов и планирования эксперимента в геотехнике значительный вклад внесли В. В. Налимов, А. А. Попов, разработавшие подходы к оценке техногенного воздействия на грунтовые массивы через планирование эксперимента [10, 11]. Несмотря на наличие фундаментальных работ, методика оперативного построения функций отклика на основе современных программных комплексов и результатов их численного моделирования объектов гидротехнического назначения (PLAXIS, GeoStudio, SiO 2D) с учетом специфики однородных плотин требует различного уточнения и верификации [12].

Техническая эксплуатация и мониторинг безопасности грунтовых гидротехнических сооружений, методы численного моделирования и математической статистики в геотехнике в настоящее время являются актуальной областью научного исследования.

Научная новизна настоящей работы заключается в методике, которая обеспечивает связку результатов инженерно-геологических изысканий с центральным композиционным ротатабельным планированием (ЦКРП) для оценки чувствительности коэффициента устойчивости однородной плотины к вариации параметров сцепления и угла внутреннего трения в реальном времени.

Практическая значимость исследования состоит во внедрении предлагаемого подхода по комплексному обследованию и анализу результатов обследования гидротехнических сооружений грунтового типа, который позволяет оптимизировать программу изысканий на эксплуатируемых ГТС, выделяя критические параметры грунта, требующие уточнения и верификации, а также снижает вычислительные затраты при проведении многофакторного анализа безопасности обследуемого сооружения.

Цель исследования

Разработка методики оперативной оценки технического состояния однородной грунтовой плотины на основе построения математических метамоделей, интегрирующих результаты натурных инженерных изысканий и данные многофакторного численного моделирования.

Методы исследования

Для оценки технического состояния обследуемого объекта используется комплексный подход, сочетающий камеральную обработку данных инженерных изысканий и численное моделирование объекта.

¹ СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84: свод правил: издание официальное: утвержден Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 29 декабря 2011 г. № 623; введен в действие с 01 января 2013 г. — Москва: Минрегион России, 2012. — 98 с.

Интерпретация данных инженерных изысканий сводится к статистической обработке результатов полевых и лабораторных исследований (согласно ГОСТ 20522²), определению нормативных и расчетных значений плотности грунта ρ , коэффициента фильтрации k_f , угла внутреннего трения φ и удельного сцепления c . При этом для обследования однородной грунтовой плотины с учетом требований к информационным технологиям активно используются методы и программные комплексы для численного моделирования. Реализация метода конечных элементов (МКЭ) сводится в контексте настоящего исследования к решению двух задач:

1. **Фильтрационная задача:** определение положения депрессионной кривой и градиентов фильтрации;
2. **Геомеханическая задача:** расчет коэффициента устойчивости откосов (и низового, и верхового) с использованием метода снижения прочности (Strength Reduction Method).

Комплексное (совместное) интегрированное использование вышеуказанных методов исследования (обследования) гидротехнического объекта проводится «в период обследования», то есть геометрия модели объекта и параметры материалов соответствуют фактическим данным, полученным в ходе текущих инженерных изысканий, включая зафиксированный уровень воды в верхнем и нижнем бьефах.

Основная часть

Оценка эксплуатационной надежности однородных грунтовых плотин традиционно базируется на сопоставлении расчетных показателей (коэффициента устойчивости, градиентов фильтрации) с их нормативными значениями, установленными в СП 39.13330.2012. Однако натурные данные инженерных изысканий свидетельствуют о существенной статистической изменчивости характеристик грунтов (удельного сцепления, угла внутреннего трения, коэффициента фильтрации), вызванной как природной неоднородностью, так и процессами суффозии или заиливания в процессе эксплуатации [13].

Традиционный подход «детерминированного расчета», использующий фиксированные средние значения параметров, не позволяет оценить риск потери устойчивости при неблагоприятном сочетании факторов [14]. С другой стороны, прямое численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) для каждой возможной комбинации параметров требует значительных вычислительных и временных затрат, что затрудняет оперативный мониторинг ГТС.

Применение математического планирования эксперимента (МПЭ) в постановке темы для данного исследования обусловлено следующими предпосылками: 1 — многофакторностью процесса обследования и анализа полученных результатов (техническое состояние грунтового сооружения зависит от сложного взаимодействия прочностных характеристик тела и основания, уровня воды в бьефах и порового давления, а МПЭ позволяет формализовать эти зависимости в виде компактных полиномов); 2 — нелинейность функций отклика (влияние параметров грунта на общую устойчивость гидротехнического объекта редко носит линейный характер, поэтому использование планов второго порядка, например, центрального композиционного ротатабельного плана (ЦКРП), дает возможность зафиксировать моменты критического снижения прочности, которые «пропускаются» при обычном расчете по средним значениям при численном моделировании).

Математический аппарат МПЭ позволяет превратить разрозненные данные лабораторных и полевых испытаний в единую поверхность отклика. Это дает инженеру инструмент для «мгновенного»

² ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов определений. — Введ. 2013-07-01. — Москва: Стандартинформ, 2013. — 20 с.

прогноза того, как изменится безопасность сооружения при фиксации конкретных отклонений в свойствах грунта.

Таким образом, переход от единичного моделирования к планируемому эксперименту позволяет создать цифровой двойник (метамодель) плотины, который адекватно отражает результаты натурных обследований и обеспечивает научно обоснованный прогноз поведения ГТС в различных эксплуатационных сценариях.

Результаты

Использование данных по СП 39.13330.2012 в математическом планировании эксперимента требует формализации неопределенностей параметров.

Согласно требованиям вышеупомянутого нормативного документа при оценке состояния однородной плотины в качестве факторов варьирования целесообразно принимать параметры, имеющие наибольший коэффициент вариации или наибольшее влияние на расчетные критерии (табл. 1).

Таблица 1

Варьируемые факторы для планирования эксперимента

Фактор	Описание (согласно СП 39.13330.2012)
X_1	Угол внутреннего трения (φ) грунта тела плотины
X_2	Удельное сцепление (c) грунта тела плотины
X_3	Коэффициент фильтрации ($k_{\text{ф}}$) (особенно при оценке риска суффозии)
X_4	Плотность грунта (ρ) в проектном или фактическом теле
X_5	Уровень воды в верхнем бьефе (УВБ) (как внешнее воздействие)

Результатом эксперимента являются функции отклика (Y_j), которые позволяют оценить состояние объекта на момент проведения обследования. Согласно СП 39.13330.2012 приведем наиболее важные показатели, которые могут являться функциями отклика в работе по обследованию грунтового гидротехнического сооружения (табл. 2).

Таблица 2

Основные группы функций отклика, которые вариативно используются в инженерных расчетах по результатам обследования объекта

Группа функций отклика	Название функции отклика	Назначение функции отклика
Фильтрационные характеристики — наиболее критические показатели для однородных плотин, так как в них депрессионная кривая проходит непосредственно через тело насыпи.	Положение кривой депрессии	Высота выхода фильтрационного потока на низовой откос (или в дренаж).
	Удельный расход фильтрации q	Объем воды, просачивающейся через тело плотины и основание в единицу времени.
	Градиент напора I	Максимальные значения градиентов в зоне выхода потока (контроль суффозии).

	Поровое давление P_{activ}	Значение давления в разных точках тела плотины при различных уровнях верхнего бьефа.
Устойчивость откосов — определяет надежность конструкции против сползания или обрушения.	Коэффициент устойчивости (k_{st} или FOS)	Минимальный коэффициент запаса, рассчитанный методами круглоцилиндрических поверхностей (Бишоп, Morgenштейна-Прайса и др.).
	Координаты критической поверхности скольжения $x_a; y_a$	Положение центра и радиус дуги, по которой наиболее вероятно обрушение.
Напряженно-деформированное состояние (НДС) — эти функции отклика важны для оценки осадок и возможности трещинообразования.	Вертикальные и горизонтальные смещения $x; y$	Максимальная осадка гребня плотины или смещение откосов.
	Эффективные напряжения S_{eff}	Распределение нормальных и касательных напряжений в теле плотины.
	Относительная деформация ε	Степень уплотнения грунта под действием собственного веса и гидростатического давления.

Математическая модель представляется в виде полинома второго порядка:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} \cdot X_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} \cdot X_i \cdot X_{ij}, \quad (1)$$

где b_0 — свободный коэффициент, среднее значение отклика в центре эксперимента, когда все факторы находятся на нулевом уровне. Если факторы закодированы через X , то он показывает общий уровень исследуемого процесса в выбранной области; b_i — линейный коэффициент, который показывает эффект фактора: если фактор изменится на одну единицу, то функция отклика изменится на величину b_i ; b_{ij} — коэффициент парных взаимодействий, показывает, что влияние одного фактора зависит от уровня, на котором находится другой фактор.

На основе анализа факторов и функций отклика, указанных в **табл. 1 и 2**, для любого объекта составляется свой индивидуальный план эксперимента с определенным набором факторов. Количество факторов, указанных в плане эксперимента, а также количество функций отклика будут определять объем обработки данных и количество регрессионных моделей и парных взаимодействий. С учетом вышесказанного предлагаются следующие рекомендации по составлению планов эксперимента для обработки инженерных данных по грунтам и численному моделированию грунтовых плотин:

1. Выбор плана: для минимизации количества численных расчетов рекомендуется использовать центральное композиционное ротатабельное планирование (ЦКРП). Это позволяет получить адекватную модель при криволинейной зависимости отклика от факторов [15].

2. Учет натуральных данных: границы варьирования факторов ($[-1; +1]$ в кодированных переменных) должны строго соответствовать доверительному интервалу, полученному по результатам инженерных изысканий (согласно СП 11-105-97³).

³ СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. — М.: Стандартинформ, 2017. — 92 с.

Интеграция изысканий и МКЭ: при выявлении зон разуплотнения в теле плотины по данным статического зондирования, план эксперимента должен включать дополнительный фактор — геометрический параметр (координата или объем дефектной зоны); если по данным пьезометров наблюдается аномально высокий уровень депрессионной кривой, основным фактором варьирования должен стать коэффициент фильтрации с учетом анизотропии (k_x/k_z).

Анализ чувствительности: по полученным уравнениям регрессии необходимо ранжировать коэффициенты b_i . Параметры с наибольшими коэффициентами являются приоритетными для дальнейшего мониторинга и уточнения в ходе дополнительных изысканий.

Точная квадратичная модель исследуемого и обследуемого объекта может быть получена с помощью уравнений регрессии, которые позволяют учесть кривизну поверхности функции отклика (например, нелинейное падение устойчивости низового откоса плотины при росте уровня воды в верхнем бьефе).

Требования Ростехнадзора к проведению многофакторного обследования объектов гидротехнического назначения, срок службы которых превышает 25 лет, определяется целым рядом нормативных документов^{4,5}, которые в свою очередь, также будут для настоящей методики определять факторы варьирования и функции отклика.

Примерный план эксперимента по обработке данных, полученных при инженерных изысканиях условного объекта обследования, выглядит следующим образом. Представим трехфакторный план ЦКРП для однородной грунтовой плотины из уплотненного суглинка в *табл. 3*.

Таблица 3

План трехфакторного эксперимента ЦКРП 2³

№ опыта	Тип точки	X ₁	X ₂	X ₃	Описание значений факторов
1–8	Ядро	±1	±1	±1	Углы куба [16]
9	Звездная	–1,682	0	0	Минимальный критический угол трения
10	Звездная	+1,682	0	0	Максимально возможный угол трения
11	Звездная	0	–1,682	0	Минимально критическое сцепление
12	Звездная	0	+1,682	0	Максимально возможное сцепление
13	Звездная	0	0	–1,682	Минимальный уровень воды (НПУ/УМО)
14	Звездная	0	0	+1,682	Максимальный форсированный уровень (ФПУ)
15–20	Центр	0	0	0	6 опытов при средних (нормативных) значениях

X₁ (φ) — угол внутреннего трения; X₂ (c) — удельное сцепление грунта; X₃ (УВБ) — уровень верхнего бьефа. Для комбинации этих варьируемых факторов оптимальным будет назначение следующих функций отклика, описывающих устойчивость гидротехнического объекта: Y₁ (k_{st} или FOS) — коэффициент устойчивости; Y₂ (I) — градиент напора; Y₃ (q) — расход фильтрации.

⁴ Федеральный закон № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений».

⁵ Постановление Правительства Российской Федерации от 05.10.2020 № 1607 «Об утверждении Положения о декларировании безопасности гидротехнических сооружений».

План состоит из трех частей: ядра, где точки полного факторного эксперимента (опыты 1–8); звездных точек — точки на осях факторов с вылетом (опыты 9–14); центральных точек — опыты при средних значениях факторов для оценки ошибки и проверки адекватности (опыты 15–20).

Для трех факторов ($k = 3$) расчетное плечо звездной точки для обеспечения ротатабельности (равноточности во всех направлениях от центра) определяется по формуле:

$$\alpha = (2k^3)^{1/4} = 8^{1/4} = 1,682. \quad (2)$$

После проведения всех 20 расчетов (опытов) и определения коэффициентов уравнения регрессии методом наименьших квадратов [16], необходимо подтвердить их достоверность. В инженерных расчетах по СП 39.13330.2012 это критически важно, чтобы исключить влияние случайных погрешностей моделирования. Проверка проходит в два этапа: через критерий Стьюдента (для каждого коэффициента) и критерий Фишера (для всей модели в целом) [18].

Одной из ключевых особенностей перехода от натуральных данных к математическому планированию является обоснование интервала варьирования (h_i). В задачах оценки состояния однородных грунтовых плотин согласно СП 39.13330.2012 и ГОСТ 20522, физико-механические характеристики грунтов не являются константами, а представляют собой случайные величины с определенным законом распределения.

Для того чтобы матрица планирования адекватно отражала реальное состояние объекта, установление уровней факторов (нижнего — 1, основного — 0, верхнего +1) должно производиться по следующему алгоритму:

1. Основной уровень (X_{i0}) принимается равным математическому ожиданию (среднему значению) параметра по результатам статистической обработки данных изысканий. Например, нормативное значение удельного сцепления c_n .

2. Интервал варьирования (h_i) рассчитывается исходя из коэффициента вариации (v) и требуемой доверительной вероятности. В инженерной практике целесообразно принимать h_i равным одному или двум среднеквадратичным отклонениям (σ). Так, например, если по результатам 15 испытаний грунта тела плотины среднее сцепление $c = 25$ кПа, а $\sigma = 5$ кПа, то интервал варьирования в 5 кПа обеспечит охват около 68% всех возможных состояний грунта, а интервал в 10 кПа (2σ) — более 95%.

3. Звездное плечо (α) в центральном композиционном планировании (ЦКРП) выход в «звездные точки» ($\pm 1,682$) позволяет проверить состояние плотины при экстремально низких (но вероятных) значениях прочности, что соответствует расчетным характеристикам при доверительной вероятности $P = 0,95$.

В **табл. 4** устанавливается связь между данными, полученными в ходе инженерных изысканий и многофакторным планированием эксперимента (МПЭ). Такой подход позволяет численному моделированию с помощью метода конечных элементов «прощупать» весь спектр возможных состояний плотины.

Таблица 4

Связь данных изысканий с параметрами МПЭ (пример для сцепления c)

Параметр МПЭ	Кодированное значение	Натуральное значение (формула)	Физический смысл по изысканиям
Нижний звездный уровень	-1,682	$X_{i0} - 1,682\sigma$	Минимально возможное (расчетное) значение прочности
Нижний уровень	-1	$X_{i0} - \sigma$	Зона пониженной прочности (разуплотнение)
Основной уровень	0	X_{i0}	Нормативное (среднее) состояние грунта

Верхний уровень	+1	$X_{i0} + \sigma$	Зона повышенной плотности грунта
Верхний звездный уровень	+1,682	$X_{i0} + 1,682\sigma$	Максимально возможная прочность

Если при расчете в точке $-1,682$ коэффициент устойчивости падает ниже единицы, это является прямым сигналом о том, что при текущем разбросе данных инженерных изысканий и численного моделирования сооружение находится в предаварийном состоянии, даже если при средних значениях (точка 0) оно кажется надежным.

Особенности данного метода заключаются в переходе от статичного (одноразового) расчета к динамической метамоделю. В классическом подходе инженер берет средние значения из отчета по инженерным изысканиям и получает одно число — коэффициент устойчивости. В вашем подходе мы создаем «живую» математическую формулу.

Детализируя, можно выделить еще ряд особенностей данной методики обработки полученных данных:

1. Переход от «точки» к «полю»: рассматриваются параметры грунта не как константы, а как переменные факторы. Это позволяет оценить не просто устойчивость сооружения, а насколько она чувствительна к потере сцепления в конкретной зоне;

2. Синтез нормативных требований и математики: особенность в адаптации жестких рамок СП 39.13330.2012 (где заданы нормируемые и проверяемые параметры) к гибкому аппарату МПЭ. Таким образом, исследуется поведение объекта в «коридоре ошибок» инженерных изысканий и численного моделирования объекта.

3. Прогностическая направленность: научная новизна заключается в возможности предсказать критическое состояние объекта еще до того, как параметры грунта достигнут аварийных значений, за счет анализа кривизны поверхности отклика.

Заключение

Применение ЦКРП совместно с МКЭ позволяет сократить количество трудоемких расчетов в 5–7 раз, сохраняя точность прогноза (ошибка < 5%).

Интервалы варьирования в плане эксперимента должны строго соответствовать статистическому разбросу (σ) по данным инженерных изысканий конкретного объекта.

Для однородных грунтовых плотин приоритетным является контроль удельного сцепления грунта (c), так как его влияние на устойчивость часто является доминирующим.

Разработанная методика и получаемые с ее помощью метамоделю позволяют эксплуатирующим организациям мгновенно прогнозировать безопасность сооружения при паводках без использования сложных расчетных программных комплексов.

Рекомендации

Для проектных и экспертных организаций рекомендуется включать этап построения поверхностей отклика в состав работ по техническому обследованию ГТС. Это позволяет научно обосновать требуемый объем инженерно-геологических изысканий, сокращая количество выработок на «малозначимых» участках и увеличивая их в зонах с высокой чувствительностью модели к параметрам грунта.

По составлению планов эксперимента для однородных плотин целесообразно использовать планы не ниже второго порядка (ЦКРП). Это необходимо для фиксации эффектов взаимодействия (например, нелинейного снижения устойчивости при одновременном росте влажности грунта и уровня воды в бьефе).

Интеграция с мониторингом объектов обследования ориентирована на параметры, показавшие наибольшую значимость в ходе эксперимента (высокие коэффициенты b_i), должны быть выбраны в качестве ключевых показателей для систем автоматизированного мониторинга безопасности ГТС.

Исследования проведены в рамках государственного задания Министерства сельского хозяйства Российской Федерации (тема № 102503-2600073-9-4.1.1-4.1.1).

Библиографический список

1. Моськин К. Д. Комплекс предупредительных мер по работе с бесхозными гидротехническими сооружениями // Матрица научного познания. — 2023. — № 3-1. — С. 78–80.
2. Абрамов В. В., Булгаков Д. В. Составление декларации безопасности гидротехнических сооружений, находящихся в федеральной собственности // Вестник мелиоративной науки. — 2021. — № 1. — С. 82–89.
3. Rasskazov L. N., Yadgorov E. K., Nikolaev V. B. Field Observations of Soil Settlements, Displacements, and Pore Pressure in Dams // Power Technology and Engineering. — 2018. — Vol. 51, No. 6. — Pp. 611–620. — DOI: 10.1007/s10749-018-0881-9.
4. Мирсаидов М. М., Султанов Т. З., Юлдошев Б. Ш. Методы оценки напряженного состояния грунтовых плотин с учетом влажностных свойств грунта. Ташкент: “Adabiyot uchqunlari”. 2020. — 156 с.
5. Стефанишин Д. В., Штильман В. Б. К оценке вероятности перелива воды через гребень плотины // Инженерно-строительный журнал. — 2012. — № 9 (35). — С. 70–78.
6. Саинов М. П. Напряженно-деформированное состояние грунтовых плотин с противofiltrационными элементами из материалов на основе цемента: специальность 05.23.07 «Гидротехническое строительство»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Саинов Михаил Петрович, 2018. — 599 с.
7. Анискин Н. А. Фильтрационно-температурный режим системы «плотина-основание»: специальность 05.23.07 «Гидротехническое строительство»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Анискин Николай Алексеевич. — Москва, 2009. — 40 с.
8. Орнатский Н. В. Механика грунтов. — Москва: Издательство московского университета. 1950. — 419 с.
9. Маслов Н. Н., 1955. Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве. Москва — Ленинград: Государственное энергетическое изд-во, 467 с.
10. Налимов В. В., Чернова Н. Л. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. — М.: Физматгиз, 1965. — 340 с.
11. Попов А. А. Оптимальное планирование эксперимента в задачах структурной и параметрической идентификации моделей многофакторных систем. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013. — 296 с.
12. Тер-Мартirosян А. З., Сидоров В. В., Ермошина Л. Ю. Определение и верификация параметров модели слабого грунта с учетом ползучести // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 6 (117). С. 697–708. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.6.697-708.

13. Власюк А. П., Мартынюк П. Н. Фильтрационная консолидация трёхфазных грунтов с учётом ползучести скелета и влияния солепереноса в неизотермическом режиме // Математическое моделирование. — 2010. — Т. 22, № 4. — С. 32–56.

14. Исмаилова К. Д., Бектенов Э. Учет анизотропии в грунтовых плотинах // Вестник Пространство ученых в мире. — 2023. — № 2-3. — С. 93–98.

15. Меннанов Э. М., Родин С. В., Калафатов Д. А., Богоцкий Ю. Г. Планирование эксперимента при исследовании силового взаимодействия фундаментов с грунтовым основанием // Строительство и техническая безопасность. — 2024. — № 34 (86). — С. 31–37.

16. Бойко А. Ф., Воронкова М. Н. Теория планирования многофакторных экспериментов. — Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2020. — 75 с.

FEATURES OF ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF A HOMOGENEOUS EARTH DAM BASED ON ENGINEERING SURVEYS AND MATHEMATICAL PLANNING OF THE EXPERIMENT

A. E. Kachaev
S. S. Turapin

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

Abstract

The article discusses a comprehensive approach to assessing the technical condition of homogeneous earth-fill dams, based on the integration of field engineering survey data and mathematical experimental design methods. The author proposes a methodology for transitioning from labor-intensive single numerical calculations using the finite element method to the construction of analytical meta-models of the structure's state. The work justifies the use of central composite rotatable design to approximate the dependence of the stability coefficient on the physical and mechanical properties of soils and hydrological loads in accordance with SP 39.13330.2012. Key variation factors and response functions are identified, allowing for the ranking of soil parameters by their degree of influence on dam reliability. The research results enable the optimization of engineering survey scopes by identifying the most critical characteristics for monitoring. The developed recommendations can be applied for operational safety forecasting of hydraulic structures under changing operational conditions.

The Keywords

Dam, engineering surveys, experimental design, stability coefficient, hydraulic structure, soil cohesion.

Date of receipt in edition

01.04.2026

Date of acceptance for printing

10.04.2026

Ссылка для цитирования:

А. Е. Качаев, С. С. Турапин. Особенности оценки технического состояния однородной грунтовой плотины по данным инженерных изысканий и математического планирования эксперимента. — Системные технологии. — 2026. — № 1 (58). — С. 128–137.