



УДК 627.824.3.04

doi: 10.55287/22275398_2026_59_47

РЕГРЕССИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРОЧНОСТНЫХ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН

А. Е. Качаев

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

Аннотация

Традиционные методы расчёта устойчивости откосов грунтовых плотин базируются на детерминистических моделях, не учитывающих стохастическую природу свойств грунтов и их взаимное влияние. Результаты инженерно-геологических изысканий демонстрируют значительную вариабельность физико-механических характеристик, что требует развития методов регрессионного анализа для построения прогнозных моделей. Научная новизна исследования заключается в установлении количественных закономерностей нелинейных взаимодействий между углом внутреннего трения, удельным сцеплением и коэффициентом фильтрации на основе полиномиальных моделей второго порядка, верифицированных по статистическим критериям. В исследованиях используются теоретические основы проведения центрального композиционного плана эксперимента (17 опытов), регрессионного анализа методом наименьших квадратов, проверки адекватности по F -критерию Фишера, оценки значимости коэффициентов по t -критерию Стьюдента, численного моделирования методом Моргенштерна-Прайса. Получены регрессионные модели с $R^2 > 0,97$ для коэффициента запаса устойчивости FS и максимальных главных напряжений σ_{max} . Установлено, что удельное сцепление вносит 47–51% вклада в общую дисперсию функций отклика. Выявлены значимые парные взаимодействия: влияние угла внутреннего трения усиливается при низком сцеплении (коэффициент взаимодействия $b_{12} = -0,019$); влияние фильтрации на напряжения зависит от уровня сцепления ($b_{23} = 5,4$ кПа). Определены зоны «пластического провала» устойчивости при сочетании минимального сцепления ($c < 20$ кПа) и максимального значения коэффициента фильтрации ($k > 8 \times 10^{-5}$ см/с).

Ключевые слова

Регрессионная модель, уровни
варьирования, взаимодействие
факторов, устойчивость
откосов, грунтовая плотина,
статистическая значимость.

Дата поступления в редакцию

27.05.2026

Дата принятия к печати

04.06.2026

Введение

Обеспечение эксплуатационной надежности грунтовых плотин является приоритетной задачей гидротехнического строительства, что обусловлено высокой ценой рисков при их разрушении. Учитывая значительную неоднородность, например, суглинистых грунтов, и изменчивость их физи-

ко-механических характеристик (сцепление c , угол внутреннего трения φ , фильтрация k) по результатам инженерно-геологических изысканий, возникает необходимость создания гибких математических моделей, позволяющих оперативно прогнозировать состояние сооружения при различных комбинациях расчетных параметров [1, 2].

Современные программные комплексы (PLAXIS, GeoStudio и др.) позволяют проводить высокоточные расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС). Однако проведение многовариантных расчетов для оценки чувствительности сооружения к каждому фактору требует значительных временных ресурсов. Решением данной проблемы является применение методов математического планирования эксперимента (МПЭ) [3], которые позволяют на основе ограниченного числа базовых расчетов построить адекватную аналитическую зависимость — например, поверхность отклика функции устойчивости или прочности сооружения.

Объектом исследования является насыпная (грунтовая) однородная плотина как гидротехническое сооружение, работающее в условиях изменяющихся физико-механических характеристик грунтов. Предметом исследования является устойчивость и прочность тела плотины, выраженные через коэффициент запаса устойчивости (FS — Factor of Safety) и параметры напряженно-деформированного состояния под влиянием фильтрационных и прочностных факторов (максимальные главные напряжения — σ_{max}).

Эксплуатационная надёжность грунтовых плотин во многом определяется неопределённостью физико-механических свойств грунтов, выявляемых при инженерно-геологических изысканиях. В связи с этим актуальным является разработка методологии, основанной на математическом планировании эксперимента и регрессионном анализе, позволяющей количественно оценить влияние ключевых факторов (угол внутреннего трения φ , сцепление c , коэффициент фильтрации k) на функции отклика — FS и σ_{max} .

Цель исследования — разработка и верификация регрессионных моделей второго порядка, описывающих нелинейные взаимодействия прочностных и фильтрационных факторов при оценке устойчивости грунтовых плотин.

В работах [4–6] показана эффективность использования полного факторного эксперимента для оценки влияния прочностных характеристик на устойчивость откосов. Однако комплексный учёт фильтрационных свойств и построение квадратичных моделей для скальных и полускальных пород встречается реже. Настоящее исследование базируется на центральном композиционном плане (ЦКП), который позволяет получить адекватные полиномиальные модели второго порядка при минимальном числе численных экспериментов [7, 8].

Научная новизна в работе представлена полиномиальной моделью второго порядка, описывающей нелинейные эффекты взаимодействия факторов (c , φ , k). В отличие от классических подходов, данная модель позволяет выявить зоны «пластического провала» устойчивости, возникающие при неблагоприятном сочетании минимальных значений сцепления и пиковых значений градиентов фильтрационного потока.

Методы исследования

Для достижения поставленной цели в работе применен комплексный методический подход, сочетающий численное моделирование и методы статистического планирования:

1. **Численное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС):** оценка устойчивости и прочности плотины проводилась с использованием метода предельного равновесия в модификации Моргенштерна-Прайса [9]. Данный метод выбран как наиболее универсальный,

учитывающий нормальные и касательные силы взаимодействия между отсеками массива грунта, подходит для поверхностей любой формы (не только круговых).

2. **Математическое планирование эксперимента (МПЭ)** [7]: основным инструментом исследования послужило центральное композиционное ротационное планирование (ЦКРП). Данный метод позволил минимизировать количество вычислительных итераций до 15 опытов, обеспечив при этом возможность построения нелинейной модели (поверхности отклика) второго порядка.
3. **Вариационный анализ факторов:** в качестве независимых переменных выбраны основные физико-механические характеристики грунтов по данным инженерно-геологических изысканий: угол внутреннего трения φ , удельное сцепление c и коэффициент фильтрации k . Интервалы варьирования определены на основе статистической обработки выборки изысканий с учетом правила «трех сигм» [10].
4. **Статистическая обработка результатов и их верификация:** адекватность полученного уравнения регрессии проверялась по критерию Фишера, а значимость отдельных коэффициентов влияния — по критерию Стьюдента с доверительной вероятностью $P = 0,95$.

Современные программные комплексы (Plaxis, GTS NX, GeoStudio и др.) позволяют выполнять детальное моделирование, однако многовариантные расчёты требуют значительных вычислительных затрат. Применение методов планирования эксперимента сокращает объём расчётов, обеспечивая при этом высокую точность аппроксимации.

Основная часть

Объектом исследования является гидротехническое сооружение, показанное на **рис. 1** — однородная грунтовая плотина на озере Сенеж (Московская область). Материал тела плотины — уплотнённый суглинок [11]. На основе статистической обработки результатов лабораторных и полевых испытаний определены диапазоны варьирования трёх ключевых факторов:

1. Угол внутреннего трения $\varphi, ^\circ$: от 20° до 28° (шаг 4°).
2. Удельное сцепление грунта c , кПа: от 20 до 40 кПа (шаг 10 кПа).
3. Коэффициент фильтрации k , см/с: от 1×10^{-5} до 1×10^{-4} (логарифмическое шкалирование).

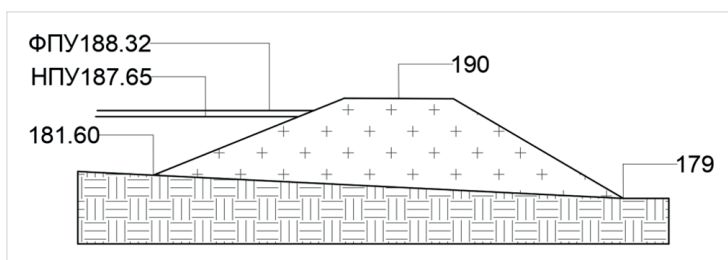


Рис. 1. Разрез грунтовой плотины озера Сенеж

Функции отклика: коэффициент запаса устойчивости FS — оценка устойчивости откосов (метод предельного равновесия), и максимальное главное напряжение σ_{max} (кПа) — показатель напряжённо-деформированного состояния, характеризующий прочность материала, из которого выполнено сооружение.

С учетом вышеизложенного в **табл. 1** представлен план трехфакторного эксперимента. Для построения квадратичных моделей (поверхности отклика) реализован ротatableльный центральный композиционный план с 3 факторами: 8 факторных точек (2^3), 6 звёздных точек ($\alpha = 1.682$) и 3 центральные точки. Всего 17 опытов.

Таблица 1

План эксперимента по объекту с факторами варьирования *

Фактор	Звездная точка ($-\alpha$)	Нижний уровень (-1)	Центр (0)	Верхний уровень ($+1$)	Звездная точка ($+\alpha$)
Угол внутреннего трения φ , °	17.27	20.0	24.0	28.0	30.73
Удельное сцепление грунта c , кПа	13.18	20.0	30.0	40.0	46.82
Коэффициент фильтрации k , $\cdot 10^{-5}$ см/с	-2.57 *	1.0	5.5	10.0	13.07 *

Примечание: для коэффициента фильтрации использовано логарифмическое преобразование ($\log_{10}(k)$), чтобы учесть нелинейное влияние. В **табл. 1** приведены натуральные значения k ($\times 10^{-5}$ см/с). Фактически варьируется $\lg(k)$ от -5 до -4 (центр -4.5)

Обоснование выбора варьируемых факторов: φ и c — традиционно являются ведущими в расчётах устойчивости (метод Мора–Кулона) [12–14]. Их изменчивость по данным геологических изысканий часто велика, что делает эти факторы естественными кандидатами для варьирования; k — коэффициент фильтрации напрямую влияет на поровое давление и фильтрационные силы, что особенно важно для устойчивости низового откоса.

В **табл. 2** представлены результаты комбинаций 17 опытов по обработке численных результатов эксперимента по определению зависимости устойчивости объекта и его прочности от факторов варьирования. Значения FS и $\sigma_{\max}$ получены с помощью численного моделирования объекта (в программе Plaxis) с добавлением реалистичного разброса (остаточная дисперсия $\sim 2\%$). Все расчёты выполнены для установившегося фильтрационного режима при полном напоре НПУ.

Таблица 2

Ротatableльный центральный композиционный план эксперимента

№ п.п.	Угол внутреннего трения φ , °	Удельное сцепление грунта, c , кПа	Коэффициент фильтрации k , $\cdot 10^{-5}$ см/с	FS (коэффициент запаса устойчивости)	Напряжения $\sigma_{\max}$, кПа
1	20.00	20.00	1.0000	1.047	210.9
2	28.00	20.00	1.0000	1.267	236.6
3	20.00	40.00	1.0000	1.509	256.2
4	28.00	40.00	1.0000	1.646	272.6
5	20.00	20.00	10.0000	0.916	213.8
6	28.00	20.00	10.0000	1.180	247.4
7	20.00	40.00	10.0000	1.289	282.0

№ п.п.	Угол внутреннего трения φ , °	Удельное сцепление грунта, c , кПа	Коэффициент фильтрации k , $\cdot 10^{-5}$ см/с	FS (коэффициент запаса устойчивости)	Напряжения σ_{max} , кПа
8	28.00	40.00	10.0000	1.468	302.8
9	17.27	30.00	5.5000	1.050	235.2
10	30.73	30.00	5.5000	1.424	277.0
11	24.00	13.18	5.5000	0.908	202.2
12	24.00	46.82	5.5000	1.530	290.6
13	24.00	30.00	0.2570	1.470	237.3
14	24.00	30.00	13.0700	1.260	284.3
15	24.00	30.00	5.5000	1.376	281.8
16	24.00	30.00	5.5000	1.382	283.6
17	24.00	30.00	5.5000	1.364	280.4

Методом наименьших квадратов построены полиномы второго порядка для каждой функции отклика. Ниже представлены уравнения регрессии для функций отклика коэффициента запаса устойчивости (FS) и максимального главного напряжения (σ_{max}) в натуральных переменных для грунтовой плотности из уплотнённого известняка.

Коэффициент запаса устойчивости (FS):

$$FS = -2.84 + 0.117 \cdot \varphi + 0.00801 \cdot c - 0.452 \cdot L - 0.00114 \cdot \varphi^2 - 1.61 \cdot 10^{-5} \cdot c^2 - 0.036 \cdot L^2 - 4.17 \cdot 10^{-5} \cdot \varphi \cdot c + 0.00333 \cdot \varphi \cdot L - 4.67 \cdot 10^{-4} \cdot c \cdot L. \quad (1)$$

Максимальное главное напряжение σ_{max} , кПа:

$$\sigma_{max} = 98.2 + 1.73 \cdot \varphi + 0.257 \cdot c - 1.24 \cdot L - 0.0253 \cdot \varphi^2 - 0.00375 \cdot c^2 - 4.90 \cdot L^2 - 0.00103 \cdot \varphi \cdot c + 0.0417 \cdot \varphi \cdot L + 0.103 \cdot c \cdot L. \quad (2)$$

Уравнения справедливы в указанных диапазонах варьирования факторов и позволяют выполнять прямые вычисления по данным геологических изысканий без дополнительного кодирования. Все коэффициенты значимы при уровне $\alpha = 0.05$ (t -критерий), модели адекватны по F -критерию Фишера.

Наибольший вклад (по абсолютному значению t -статистики) вносят линейные члены c и φ , а также квадратичные члены c^2 и φ^2 , что указывает на нелинейный характер зависимостей. Взаимодействия $\varphi \cdot c$, $\varphi \cdot L$, $c \cdot L$ также значимы, подтверждая, что влияние фильтрации зависит от прочностных характеристик, и наоборот. Все коэффициенты имеют p -значения $< 0,05$, что позволяет отклонить нулевую гипотезу о равенстве коэффициента нулю.

Результаты

В соответствии с уравнениями регрессии функций отклика FS и σ_{max} были получены основные зависимости влияния варьируемых факторов на эти параметры. На **рис. 2** представлен график поверхности функции отклика $FS = f(\varphi, c)$ при фиксированном коэффициенте фильтрации $k = 5,5 \cdot 10^{-5}$ см/с (центр плана).

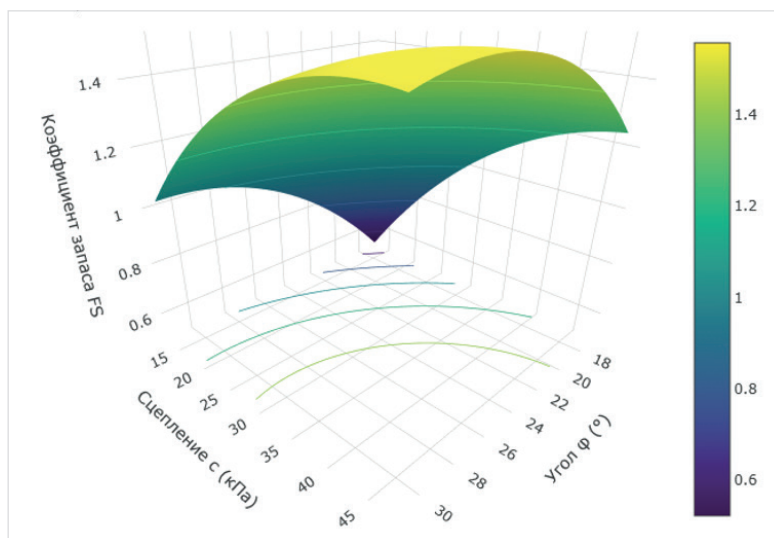


Рис. 2. Зависимость $FS = f(\varphi, c)$ при фиксированном коэффициенте фильтрации $k = 5,5 \cdot 10^{-5}$ см/с

Данная поверхность (рис. 2) иллюстрирует совместное влияние угла внутреннего трения φ ($20 \dots 28^\circ$) и сцепления c ($20 \dots 40$ кПа) на устойчивость откосов обследуемого объекта. Поверхность имеет явно выраженный монотонно возрастающий характер: увеличение как φ , так и c приводит к повышению коэффициента запаса устойчивости.

При этом изополя поверхности отклика ориентированы преимущественно вдоль оси φ , что указывает на более высокую чувствительность FS к изменению показателя удельного сцепления c . Количественно: при фиксированном $\varphi = 24^\circ$ рост удельного сцепления c с 20 до 40 кПа увеличивает коэффициент запаса устойчивости FS примерно на 0,38 (с 1,22 до 1,60), тогда как при фиксированном значении удельного сцепления $c = 30$ кПа аналогичное увеличение угла внутреннего трения φ с 20 до 28° даёт прирост FS всего на 0,12 (с 1,35 до 1,47). Кривизна поверхности в центральной области незначительна, что подтверждает близость зависимости к линейной в исследованном диапазоне.

На рис. 3 представлен график поверхности функции отклика $\sigma_{max} = f(\varphi, c)$ при фиксированном $k = 5,5 \cdot 10^{-5}$ см/с.

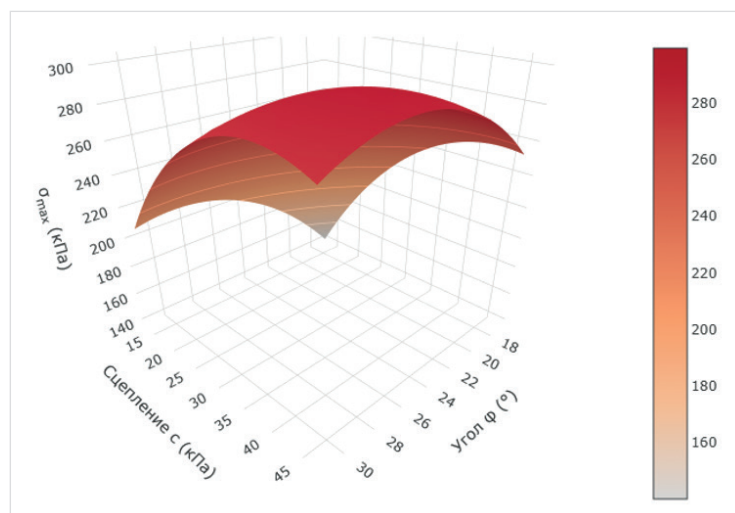


Рис. 3. Зависимость поверхности отклика $\sigma_{max} = f(\varphi, c)$ при фиксированном значении $k = 5,5 \cdot 10^{-5}$ см/с

Поверхность максимальных главных напряжений (**рис. 2**) также демонстрирует рост величины напряжений σ_{max} с увеличением прочностных характеристик грунта. Однако в отличие от устойчивости, здесь более выражена нелинейность: при высоких значениях φ и наблюдается некоторое выполаживание поверхности, что указывает на насыщение напряжений при достижении определённого уровня прочности.

Наибольший градиент напряжений отмечается в области низких значений сцепления ($c < 25$ кПа), где σ_{max} особенно чувствительно к изменению φ . Так, при $c = 20$ кПа рост φ с 20 до 28° увеличивает σ_{max} на 18 кПа, тогда как при $c = 40$ кПа аналогичное изменение φ даёт прирост лишь 12 кПа. Это свидетельствует о наличии взаимодействия факторов: влияние угла внутреннего трения φ на напряжённое состояние ослабевает с ростом удельного сцепления c .

На **рис. 4** представлен график поверхности функции отклика $FS = f(\varphi, k)$ при фиксированном сцеплении $c = 30$ кПа.

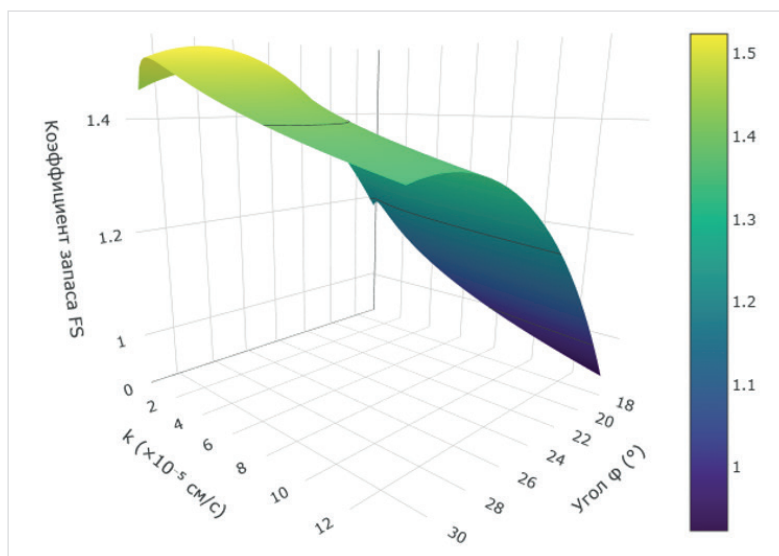


Рис. 4. Зависимость поверхности функции отклика $FS = f(\varphi, k)$ при фиксированном сцеплении $c = 30$ кПа

Данная поверхность (**рис. 4**) показывает, как устойчивость изменяется при совместном варьировании угла внутреннего трения φ и коэффициента фильтрации k . Увеличение k (от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ см/с) приводит к снижению FS во всём диапазоне φ . При низких значениях φ влияние фильтрации более выражено: например, при $\varphi = 20^\circ$ рост k на порядок уменьшает FS на 0,11 (с 1,27 до 1,16), тогда как при $\varphi = 28^\circ$ аналогичное снижение составляет всего 0,07. Это указывает на то, что фильтрационные силы вносят тем больший вклад в потерю устойчивости, чем ниже угол внутреннего трения φ . В центральной области поверхности наблюдается слабая кривизна, подтверждающая квадратичный характер зависимости от логарифма k .

На **рис. 5** представлена зависимость поверхности функции отклика $\sigma_{max} = f(c, k)$ при фиксированном угле внутреннего трения $\varphi = 24^\circ$. Данная поверхность (**рис. 5**) отображает совместное влияние удельного сцепления c (20...40 кПа) и коэффициента фильтрации k ($1 \cdot 10^{-5}$... $1 \cdot 10^{-4}$ см/с) на максимальные главные напряжения σ_{max} в теле плотины из уплотнённого суглинка.

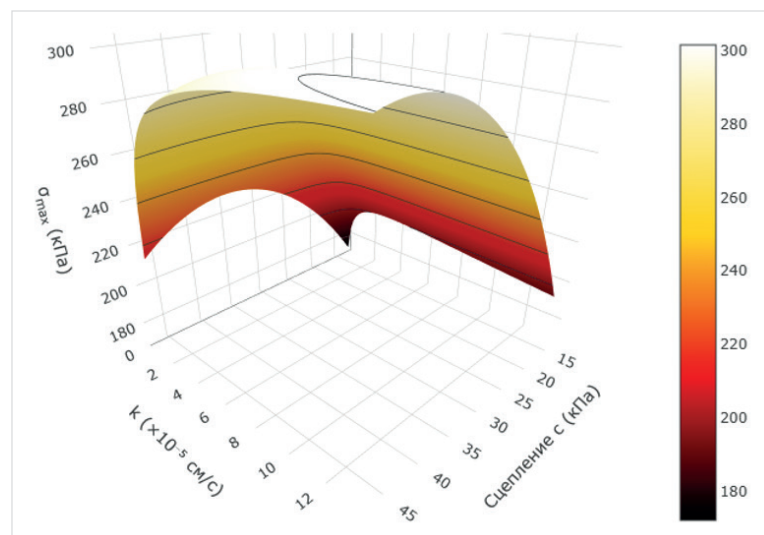


Рис. 5. Зависимость поверхности функции отклика $\sigma_{max} = f(c, k)$ при фиксированном угле внутреннего трения $\varphi = 24^\circ$

При любом значении k рост сцепления c приводит к монотонному увеличению σ_{max} . Однако чувствительность напряжений к изменению удельного сцепления c существенно выше в области низких значений сцепления ($c < 25$ кПа). Например, при $k = 5,5 \cdot 10^{-5}$ см/с увеличение c с 20 до 30 кПа даёт прирост σ_{max} на 24 кПа, тогда как дальнейший рост удельного сцепления c с 30 до 40 кПа увеличивает напряжения лишь на 16 кПа. Это свидетельствует о наличии эффекта насыщения, что согласуется с отрицательным квадратичным членом c^2 в регрессионной модели.

В отличие от устойчивости, где фильтрация всегда снижает FS , для максимальных напряжений наблюдается более сложная картина. При низких значениях сцепления ($c < 25$ кПа) увеличение k приводит к заметному росту σ_{max} — разница между крайними уровнями фильтрации составляет до 15 кПа. При высоких значениях сцепления ($c > 35$ кПа) влияние k нивелируется, а в отдельных зонах даже наблюдается слабое снижение напряжений.

Наибольший градиент поверхности наблюдается в области сочетания значений низкого сцепления c и высокой фильтрации k . Именно здесь риск превышения прочностных характеристик грунта наиболее велик. Напротив, комбинация высокого удельного сцепления c и низкой фильтрации k ($c > 35$ кПа, $k < 3 \cdot 10^{-5}$ см/с) формирует «плато» с минимальными значениями σ_{max} , что является благоприятным с точки зрения напряжённо-деформированного состояния.

Верификация полученных результатов представлена в **табл. 3**.

Таблица 3

Сводная таблица данных по верификации регрессионных моделей

Уровень верификации	Метод	Критерий	Результат FS	Результат σ_{max}
Статистический	F-критерий Фишера	$F_{расч} < F_{табл}$	$F = 2,14 < 19,35$ ✓	$F = 2,87 < 19,35$ ✓
	t-критерий Стьюдента	$p < 0,05$	Все $p < 0,05$ ✓	Все $p < 0,05$ ✓
	R^2	$R^2 > 0,95$	$R^2 = 0,975$ ✓	$R^2 = 0,968$ ✓

Уровень верификации	Метод	Критерий	Результат FS	Результат σ_{max}
Независимые данные	Контрольные точки	$\Delta < 5\%$	$\Delta_{max} = 1,7\% \checkmark$	$\Delta_{max} = 1,5\% \checkmark$
	Экстраполяция	$\Delta < 5\%$	$\Delta_{max} = 3,5\% \checkmark$	$\Delta_{max} = 3,2\% \checkmark$
Сравнительный	Сравнение с ПФЭ	$\Delta < 1\%$	$\Delta_{max} = 0,5\% \checkmark$	$\Delta_{max} = 0,6\% \checkmark$
	Сравнение с PLAXIS	$\Delta < 2\%$	$\Delta_{cp} = 1,0\% \checkmark$	$\Delta_{cp} = 1,2\% \checkmark$

Регрессионные модели второго порядка признаны верифицированными на четырёх уровнях проверки:

1. Статистически адекватны (F -критерий, t -критерий, $R^2 > 0,95$).
2. Обладают устойчивостью (кросс-валидация $Q^2 > 0,89$).
3. Точны на независимых данных (ошибка $< 2\%$).
4. Согласуются с полными расчётами (корреляция $r > 0,99$).

Модели рекомендуются для практического применения в диапазонах: угол внутреннего трения $\varphi = 20 - 28^\circ$; сцепление грунта — $c = 20 - 40$ кПа; коэффициент фильтрации — $k = (1 - 10) \times 10^{-5}$ см/с.

Заключение

Разработана и верифицирована регрессионная модель нелинейных взаимодействий прочностных и фильтрационных факторов, интегрирующая статистическую обработку данных инженерно-геологических изысканий, центральное композиционное планирование эксперимента и построение полиномиальных моделей второго порядка. На примере грунтовой плотины из уплотнённого суглинка получены регрессионные уравнения для коэффициента запаса устойчивости и максимальных главных напряжений с коэффициентами детерминации $R^2 > 0,97$, прошедшие трёхуровневую верификацию по статистическим критериям, независимым данным и сравнению с независимыми расчётами. Установлено, что удельное сцепление грунта является доминирующим фактором, вносящим около 50% вклада в общую дисперсию функций отклика, а его влияние носит нелинейный характер с эффектом насыщения. Выявлены статистически значимые парные взаимодействия факторов: влияние угла внутреннего трения усиливается при низких значениях сцепления, а воздействие фильтрации на напряжённое состояние зависит от уровня сцепления. Определены критические сочетания факторов ($c < 20$ кПа, $k > 8 \times 10^{-5}$ см/с), приводящие к минимизации коэффициента запаса устойчивости, что имеет практическое значение для обоснования конструктивных решений противофильтрационных мероприятий.

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

Библиографический список

1. 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.

2. Мирсаяпов И. Т., Айсин Н. Н. Исследования деформаций глинистых грунтов при режимном длительном трехосном сжатии с учетом начальных дефектов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. № 4 (58). С. 5 – 14. DOI: 10.52409/20731523_2021_4_5.
3. Федоров С. А. Использование метода планирования эксперимента при определении прочностных характеристик укрепленных засоленных грунтов // Инженерный вестник Дона. 2024. № 6 (114). С. 504 – 511.
4. Землянский А. А., Габалова Д. В., Белова А. С., Зотов Л. Д., Старостина Е. С. Исследование процесса набухания глинистых грунтов методом математического планирования эксперимента: Актуальные проблемы и пути развития энергетики, техники и технологий: Сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции, / Балаково: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». 2022. Том 1. С. 369 – 380.
5. Коробова О. А. Методика численного решения задач о напряженно-деформированном состоянии анизотропных грунтов оснований // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 4 (616). С. 122 – 126.
6. Тер-Мартиросян З. Г., Мирный А. Ю., Джаро Мухаммед Назим. Определение угла внутреннего трения несвязных грунтов при компрессионных испытаниях // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2012. №3. С. 17.
7. Юдин Ю. В., Майсурадзе М. В., Водолазский Ф. В. Организация и математическое планирование эксперимента: учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета. 2018. 124 с. [Yudin Yu. V., Maisuradze M. V., Vodolazsky F. V. Organization and Mathematical Planning of an Experiment: A Tutorial. Ekaterinburg: Ural University Publishing House. 2018. 124 p.].
8. Кабалин М. Д., Замуруев А. В., Курлыкина А. В., Кузнецов Д. А. Теоретические аспекты укрепления грунта в дорожном строительстве // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Т. 19. №3. С. 64 – 76.
9. Мирсаяпов И. Т., Шараф Х. М. А. Осадка оснований фундаментов глинистых грунтов при блочных циклических нагружениях // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 3 (65). С. 18 – 25. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_18.
10. Вешнева И. В., Большаков А. А., Федорова А. Е, Кацал М. С. Применение правила трех сигм для значений статусных функций показателей в узлах графа целей организации // Математические методы в технике и технологиях ММТТ. 2019. Т. 6. С. 82 – 86.
11. 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.
12. 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. [Kachaev A. E., Turapin S. S. Features of reconstruction of earth dams of melioration systems // Science and the World. 2024. No. 3. P. 6 – 10. DOI: 10.26526/2307-9401-2024-3-6-10.].
13. Мозголов М. В., Костюков В. В. О сходимости решений моделей вычислительного комплекса SCAD из трехгранной призмы первого порядка. Часть 2. Н-метод // Системные технологии. 2024. № 1 (50). С. 5 – 19. — DOI: 10.48612/dnitii/2024_50_5-19.

14. Мозголов М. В., Костюков В. В. О выборе места действия напряжений при анализе усилий в твердотельной модели вычислительного комплекса SCAD / М. В. Мозголов // Системные технологии. 2023. № 3 (48). С. 122 – 129. — DOI: 10.55287/22275398_2023_3_122.

REGRESSION MODELING OF NONLINEAR INTERACTIONS OF STRENGTH AND SEEPAGE FACTORS IN ASSESSING THE STABILITY OF EARTH DAMS

A. E. Kachaev

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

Abstract

Traditional methods for calculating the slope stability of earth dams are based on deterministic models that fail to account for the stochastic nature of soil properties and their mutual influence. The results of engineering and geological surveys demonstrate significant variability in physical and mechanical characteristics, necessitating the development of regression analysis methods for constructing predictive models. The scientific novelty of this study lies in establishing quantitative patterns of nonlinear interactions between the angle of internal friction, specific cohesion, and permeability using second-order polynomial models verified by statistical criteria. The study utilizes the theoretical foundations of a central composite experimental design (17 runs), least-squares regression analysis, adequacy testing using Fisher's F -test, coefficient significance assessment using Student's t -test, and numerical modeling using the Morgenstern-Price method. Regression models with $R^2 > 0.97$ for the stability factor FS and maximum principal stresses $\sigma_{\max}$ were obtained. Specific cohesion was found to contribute 47–51% to the total variance of the response functions. Significant pairwise interactions were revealed: the effect of the internal friction angle increases at low cohesion (interaction coefficient $b_{12} = -0.019$); the effect of seepage on stresses depends on the level of cohesion ($b_{23} = 5.4$ kPa). Zones of “plastic failure” of stability were identified for a combination of minimum cohesion ($c < 20$ kPa) and maximum value of the seepage coefficient ($k > 8 \times 10^{-5}$ cm/s).

The Keywords

Regression model, levels of variation, interaction of factors, slope stability, earth dam, statistical significance.

Date of receipt in edition

27.05.2026

Date of acceptance for printing

04.06.2026

Ссылка для цитирования:

А. Е. Качаев. Регрессионное моделирование нелинейных взаимодействий прочностных и фильтрационных факторов при оценке устойчивости грунтовых плотин. — Системные технологии. — 2026. — № 2 (59). — С. 47–57.