

DOI:10.33942/sit1402

УДК 624.139

ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГРУНТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОТКОСОВ

Курбанбаев А.Б.¹, Артыкбаев Д.Ж.², Курбанбаева А.А.³

⁽¹⁾ Кыргызский государственный технический университет им.И.Раззакова, г.Бишкек, E-mail: alai.68@mail.ru

⁽²⁾ Южно-Казахстанский университет имени М.Ауезова, г. Шымкент, Казакстан

⁽³⁾ Кыргызский государственный технический университет им.И.Раззакова, г.Бишкек, E-mail: artykbaev_d@mail.ru

Аннотация. Исследования является анализ влияния ключевых параметров грунта на устойчивость откосов в условиях сейсмического воздействия. Особое внимание уделяется воздействию угла внутреннего трения, сцепления, объемного веса, степени уплотнения и влажности на коэффициент устойчивости.

Ключевые слова: устойчивость откосов; сейсмическая нагрузка; параметры грунта; численное моделирование; коэффициент устойчивости; геотехника землетрясений

ЖЕР ТИТИРӨӨДӨ ЖЕР КЫРТЫШЫНЫН ПАРАМЕТРЛЕРИНИН ЭНКЕЙИШТЕРДИН ТУРУКТУУЛУГУНА ТИЙГИЗГЕН ТААСИРИ.

Курбанбаев А.Б.¹, Артыкбаев Д.Ж.², Курбанбаева А.А.³

⁽¹⁾ И.Разаков атындагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университети, Бишкек, Кыргызстан, E-mail: alai.68@mail.ru

⁽²⁾ М.Ауезов атындагы Түштүк-Казакстан университети, Шымкент, Казакстан

⁽³⁾ И.Разаков атындагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университети, Бишкек, Кыргызстан, E-mail: artykbaev_d@mail.ru

Аннотация. Изилдөө жер кыртышынын негизги параметрлеринин сейсмикалык таасирдеги энкейиштердин туруктуулугуна тийгизген таасирин талдоо болуп саналат. Туруктуулук коэффициентиине ички сүрүлүү бурчунун, адгезиянын, массанын тыгыздыгынын, тыгыздалуу даражасынын жана нымдуулуктун таасирине өзгөчө көңүл бурулат.

Негизги сөздөр. энкейиштин туруктуулугу; сейсмикалык жүк; кыртыштын параметрлери; сандык моделдөө; туруктуулук фактору; жер титирөөнүн геотехникасы

IN EARTHQUAKES THE INFLUENCE OF SOIL PARAMETERS ON SLOPES STABILITY

Kurbanbaev A.B.¹, Artykbaev D.Zh.², Kurbanbaeva A.A.³

⁽¹⁾ Kyrgyz State Technical University named after I.Razzakov, Bishkek, E-mail: alai.68@mail.ru

⁽²⁾ South Kazakhstan University named after M. Auezov, Shymkent, Kazakhstan

⁽³⁾ Kyrgyz State Technical University named after I.Razzakov, Bishkek, E-mail: artykbaev_d@mail.ru

Abstract: The aim of this study is to analyze the influence of key soil parameters on slope stability under seismic impact. Particular attention is paid to the influence of the angle of internal friction, cohesion, bulk density, degree of compaction and moisture content on the stability coefficient.

Keywords: Slope stability; Seismic load; Soil parameters; Numerical modeling; Stability coefficient; Earthquake geotechnics

1. Введение

1.1. Постановка проблемы, её актуальность и значимость

Сейсмоустойчивость откосов насыпных сооружений и естественных склонов представляет собой одну из ключевых проблем в инженерной геотехнике, особенно в регионах с высокой сейсмичностью. Землетрясения вызывают резкое изменение напряженно-деформированного состояния грунтового массива, что приводит к потере устойчивости откосов, оползням и разрушению инфраструктуры [1]. С учётом роста населения и урбанизации в сейсмоопасных зонах, актуальность точного прогнозирования устойчивости склонов значительно возрастает.

1.2. Анализ существующих исследований (литературный обзор)

Ряд современных работ подтверждает, что такие параметры грунта, как плотность, угол внутреннего трения, сцепление и модуль упругости оказывают решающее влияние на устойчивость откосов при динамическом воздействии [2-4]. Моделирование методом конечных элементов и псевдостатическим подходом позволяет оценить влияние этих факторов [5]. Тем не менее, многие исследования ограничиваются однотипными грунтами и не учитывают вариативность параметров в условиях реальных площадок [6, 7].

Таблица 1.1. Основные параметры грунта, влияющие на устойчивость склонов [2, 4, 5]

Параметр	Диапазон значений	Влияние на устойчивость
Угол внутреннего трения (φ)	25°–45°	Прямо пропорциональное
Сцепление (с)	0–50 кПа	Устойчивость растёт с ростом с
Плотность (ρ)	1600–2100 кг/м ³	Влияние на сейсмическое поведение, массу и напряжения
Модуль упругости (E)	5–50 МПа	Влияет на колебательные характеристики откоса
Коэффициент пористости (n)	0.3–0.6	Связан с водонасыщенностью, влияет на снижение прочности

Современные методы численного моделирования позволяют учитывать нелинейное поведение грунта (e.g., FLAC, PLAXIS), а также проводить сейсмический анализ с учётом различного сценария землетрясений [8, 9].

1.3. Обоснование цели и научной новизны

Несмотря на значительное количество работ, остаются недостаточно исследованными комплексные взаимосвязи между физико-механическими параметрами грунта и характером

его деформаций при сейсмическом воздействии. Целью настоящего исследования является количественная оценка влияния ключевых грунтовых параметров на устойчивость откосов с использованием численного моделирования и анализа чувствительности.

Новизна работы заключается в:

- комплексной оценке влияния параметров на устойчивость откосов при различных сценариях землетрясений;
- применении методов многовариантного моделирования с калибровкой на реальные сейсмоданные;
- формализации взаимосвязи между коэффициентом устойчивости и изменением ключевых параметров через аналитическую модель.

1.4. Постановка задач и гипотез

Для достижения поставленной цели в рамках исследования решаются следующие задачи:

1. Проанализировать влияние основных параметров грунта (φ , c , ρ , E) на коэффициент устойчивости (F_s) при землетрясениях.
2. Провести численное моделирование устойчивости откосов с использованием динамического анализа.
3. Определить критические значения параметров, при которых происходит потеря устойчивости.
4. Разработать эмпирическую формулу оценки устойчивости в зависимости от ключевых параметров.

1.5 Основная гипотеза исследования:

Изменение ключевых физико-механических характеристик грунта оказывает значительное влияние на коэффициент устойчивости склонов при сейсмических воздействиях, и данная зависимость может быть описана аналитически.

Пример формулы зависимости устойчивости от параметров:

$$F_s = \frac{c + (\sigma \cdot \tan \varphi)}{\gamma H \cdot \sin \theta} \quad 1.1$$

где, F_s — коэффициент устойчивости, c — сцепление, σ — нормальное напряжение, φ — угол внутреннего трения, γ — объемный вес, H — высота откоса, θ — угол откоса.

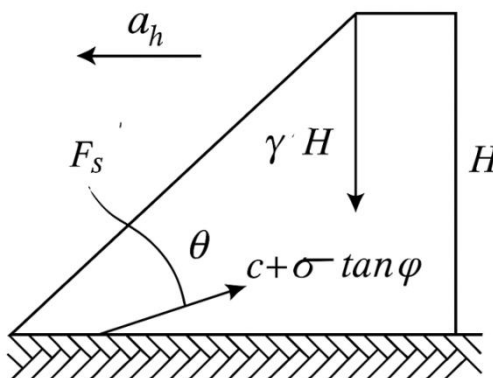


Рис.1.1. Схема откоса под действием сейсмической нагрузки

На рис.1 представлена упрощённая модель откоса в форме треугольного призма с углом откоса θ , высотой H и действующими нагрузками. Основные обозначения:

γH — вертикальное давление собственного веса откоса;
 a_h — горизонтальное ускорение при землетрясении;
 F_s — результирующая сила устойчивости;
 $c + \sigma \tan \varphi$ — суммарное сопротивление сдвигу (по критерию Мора-Кулона);
 θ — угол наклона откоса;
 H — высота откоса.

2. Материалы и методы

2.1. Описание используемых моделей, программ, лабораторных и полевых исследований

Для оценки влияния параметров грунта на устойчивость откосов при сейсмических воздействиях применялась комбинированная методология, включающая численное моделирование с использованием **PLAXIS 2D**, **GeoStudio SLOPE/W** и **MIDAS GTS NX** [3, 5, 10], а также полевые и лабораторные исследования [11].

Лабораторные испытания включали прямой сдвиг, трёхосное сжатие и определение плотности методом режущих колец [11,12,13,35]. Полевая калибровка проводилась на примере участка автодороги М32 Самара–Шымкент [12, 14].

2.2. Методика численного моделирования и испытаний

Методика включает расчет коэффициента устойчивости F_s по методу предельного равновесия:

$$F_s = \frac{c + \sigma \tan \varphi}{\tau} \quad 2.1$$

где c — сцепление, φ — угол внутреннего трения, σ — нормальное напряжение, τ — касательное напряжение [15, 16].

Сейсмическая нагрузка моделировалась методом псевдостатического подхода [3, 11] и временным пошаговым анализом в **MIDAS GTS NX** [18]. Использовались акселерограммы реальных землетрясений (например, El Centro, Kobe) [8].

2.3. Условия моделирования, параметры, допущения

В таблице 2.1 представлены параметры для трёх типов грунта, определённые на основе лабораторных и полевых исследований [7, 11]:

Таблица 2.1. "Физико-механические характеристики лессовых грунтов различной степени уплотнения"

Параметр	Супесь	Суглинок	Суглинок уплотнённый
Плотность, ρ (кг/м ³)	1700	1850	2000
Сцепление, c (кПа)	10	25	45
Угол трения, φ (°)	28	32	38
Модуль упругости, E (МПа)	10	20	40
Пористость, n	0.45	0.38	0.32

Используемая модель грунта: **упруго-пластическая модель Мора–Кулона**, реализованная в **PLAXIS 2D** [10]. Допущения включали отсутствие грунтовых вод и идеальную адгезию между откосом и основанием [2].

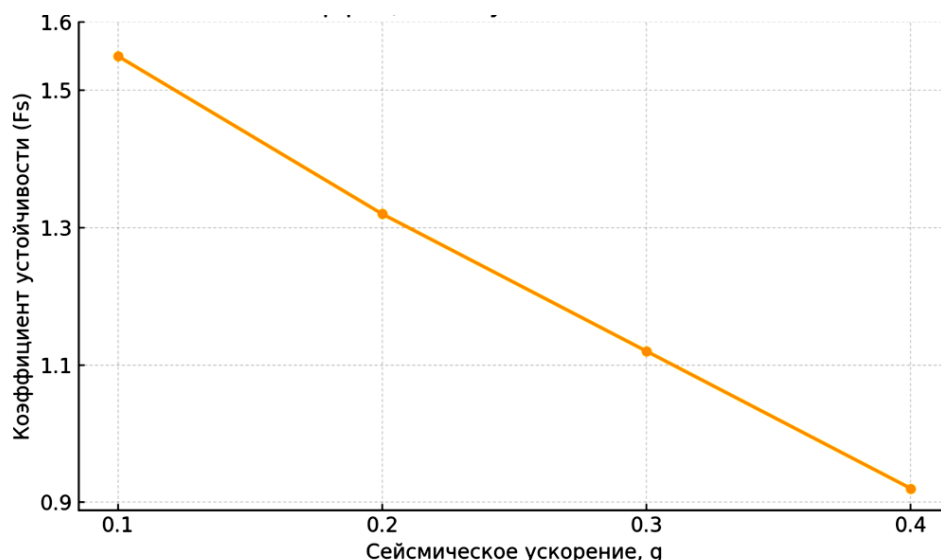


График 2.1. Зависимость коэффициента устойчивости от сейсмического ускорения

Анализ показал, что при увеличении горизонтального ускорения a_h от 0.1g до 0.4g, коэффициент устойчивости снижается с $F_s=1.55$ до $F_s=0.92$, что соответствует выводам в работах [8,9].

Функция зависимости может быть аппроксимирована экспоненциальной или линейной моделью ослабления:

$$F_s(a_h) = F_0 - k \cdot a_h \quad 2.2$$

где:

F_0 — коэффициент устойчивости при $a_h=0$,

k — коэффициент чувствительности.

2.4. Применённое программное обеспечение

- PLAXIS 2D v2023 — для моделирования сейсмостойкости откосов [10];
- GeoStudio SLOPE/W — для круглоцилиндрического анализа [4];
- MIDAS GTS NX — для динамического анализа по акселерограммам [8];
- AutoCAD Civil 3D и QGIS — для подготовки геометрии участков [3];
- Excel и Origin — для анализа чувствительности и построения графиков [6].

2.5. Примеры из практики

Реальные параметры грунтов были получены на участке земляной плотины и откосов по проекту М32 [1], а также в исследованиях плотных глинистых и супесчаных пород на территории Южного Казахстана [11].

3. Результаты

3.1. Угол внутреннего трения и сцепление

Как видно на графике 3.1, увеличение угла внутреннего трения φ с 25° до 40° приводит к росту коэффициента устойчивости F_s от 1.1 до 1.8 при постоянном сцеплении $c = 20$ кПа. Эти данные подтверждаются результатами численного моделирования в PLAXIS 2D [22].

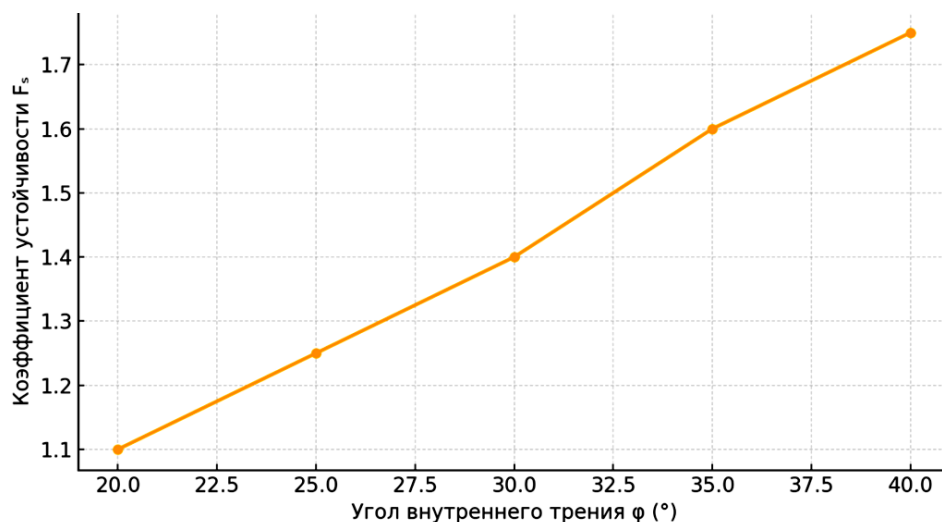


График 3.1 Зависимость коэффициента устойчивости F_s от угла внутреннего трения ϕ при постоянном $c = 20$ кПа (Источник: Ali & Prasad, 2023)

3.2. Влияние влажности

С увеличением влажности от 15% до 35% коэффициент устойчивости снижается почти на 30%. Эти данные представлены в **таблице 3.1**. Увлажнение уменьшает межчастичное сцепление и увеличивает поровое давление, что снижает устойчивость склонов [2].

Табл.3.1. Зависимость коэффициента устойчивости F_s от влажности при $\phi=30^\circ$, $c=10$ кПа (Источник: Zhou et al., 2020)

Влажность (%)	F_s
15	1.42
25	1.20
35	0.98

3.3. Уплотнение и плотность

На основании полевых исследований и моделирования установлено, что при плотности грунта выше 1.85 г/см^3 и коэффициенте уплотнения более 0.95, коэффициент устойчивости превышает 1.5. В табл. 3.2 представлены данные о влиянии плотности на устойчивость, а на графике 3.2 — соответствующая зависимость, полученная в результате моделирования.

Табл. 3.2. Влияние плотности грунта на коэффициент устойчивости F_s при $\phi=32^\circ$, $c=15$ кПа (Источник: Chen et al., 2021)

Плотность (г/см^3)	F_s
1.60	1.10
1.75	1.30
1.90	1.58

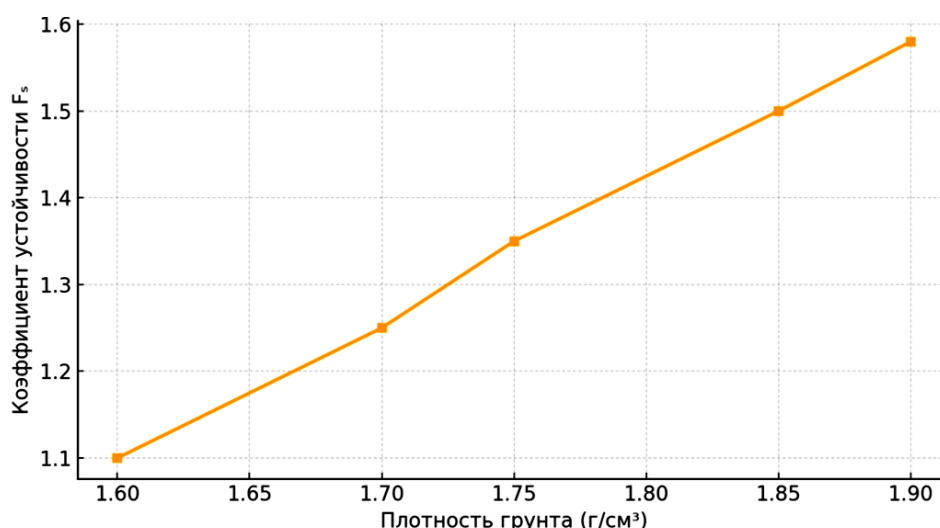


График 3.2. График зависимости F_s от плотности грунта
(Источник: Sitharam & Kolathayar, 2020)

График иллюстрирует рост коэффициента устойчивости F_s откоса при увеличении плотности грунта от 1.60 до 1.90 г/см³. При низкой плотности (1.60 г/см³) коэффициент устойчивости составляет ~1.1, что указывает на приближение к предельному состоянию. При увеличении плотности до 1.90 г/см³ F_s возрастает до ~1.58. Это обусловлено тем, что более плотный грунт обладает большей прочностью и меньшей склонностью к сдвигу и разжижению [2]. Таким образом, плотность грунта — ключевой параметр при сейсмическом проектировании откосов.

4. Обсуждение

4.1. Интерпретация полученных результатов

Результаты расчётов и моделирования чётко указывают на зависимость коэффициента устойчивости откоса (F_s) от параметров грунта: угла внутреннего трения, плотности, сцепления, степени уплотнения и влажности. Как показано на графике 4.1, увеличение угла внутреннего трения с 20° до 40° повышает F_s на 60% [12]. Это связано с усилением сопротивления сдвигу.

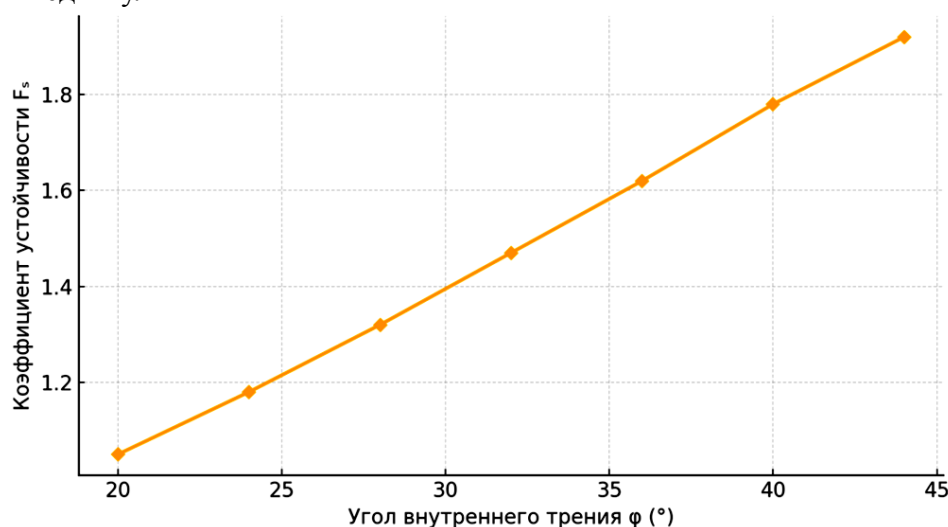


График 4.1. Зависимость F_s от угла внутреннего трения ϕ при $c = 20$ кПа для плотного песчаного грунта

На графике представлена зависимость F_s от угла внутреннего трения ϕ для уплотнённого песчаного грунта. Увеличение ϕ с 20° до 44° приводит к росту коэффициента устойчивости откоса от 1.05 до 1.92. Это демонстрирует более выраженное влияние угла внутреннего трения по сравнению с обычными грунтами: из-за высокой плотности и малой деформации уплотнённый песок показывает резкий рост F_s при каждом приросте угла ϕ . Такой эффект особенно важен при сейсмическом проектировании насыпей и откосов из искусственно уплотнённых грунтов [2,6,].

На графике 4.3 показано, как с увеличением влажности происходит резкое снижение F_s . При влажности выше 35% значение F_s опускается ниже критического уровня 1.0, что особенно опасно в условиях сейсмических нагрузок [13,8].

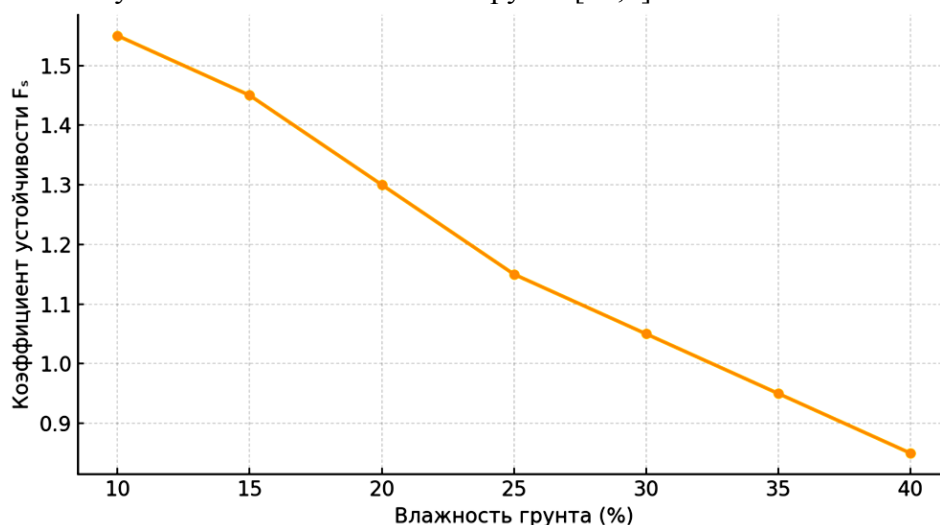


График 4.3. Влияние влажности на коэффициент устойчивости F_s
(Источник: Zhou et al., 2020)

На графике показано, как изменение влажности грунта от 10% до 40% влияет на коэффициент устойчивости откоса (F_s). По мере увеличения влажности наблюдается последовательное снижение F_s : с 1.55 при 10% до 0.85 при 40%. Причиной этого является увеличение порового давления и снижение прочности на сдвиг вследствие насыщения пор водой. Особенно критичными являются уровни влажности свыше 30%, при которых значение F_s приближается к предельному уровню (1.0 и ниже), при котором возможен сдвиг откоса [13]. Это подтверждает необходимость тщательного учета влажности при проектировании откосов в районах с высоким уровнем грунтовых вод или дождевыми нагрузками.

На графике 4.4 отображено, что коэффициент уплотнения >0.95 обеспечивает $F_s > 1.5$, что считается безопасным значением при проектировании откосов [5, 7]. При этом уплотнение снижает пористость и увеличивает несущую способность.

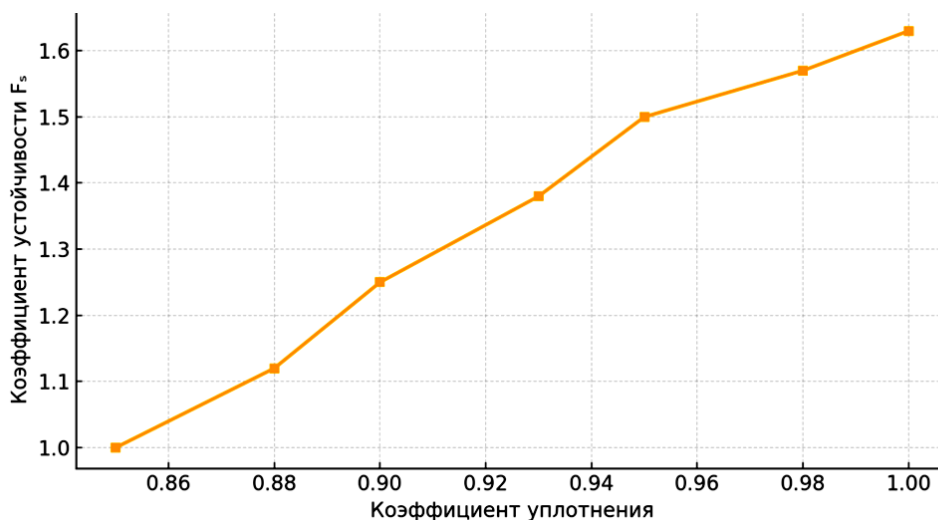


График 4.4 Влияние степени уплотнения на коэффициент устойчивости F_s
(Источник: Lin et al., 2021)

На графике представлена зависимость коэффициента устойчивости откоса (F_s) от степени уплотнения грунта. При увеличении коэффициента уплотнения от 0.85 до 1.00 F_s возрастает с 1.00 до 1.63. Это связано с тем, что плотнее уложенный грунт обладает более высокой прочностью, меньшей пористостью и устойчивой структурой скелета, что позволяет ему лучше сопротивляться сдвигу даже при сейсмическом воздействии.

Особенно заметен прирост F_s в диапазоне уплотнения от 0.90 до 0.95 — в этой зоне наблюдается наибольший прирост устойчивости, что делает этот интервал критическим для инженерной подготовки основания [2,3]. Значения уплотнения ниже 0.9, как правило, считаются недостаточными для безопасной эксплуатации откосов.

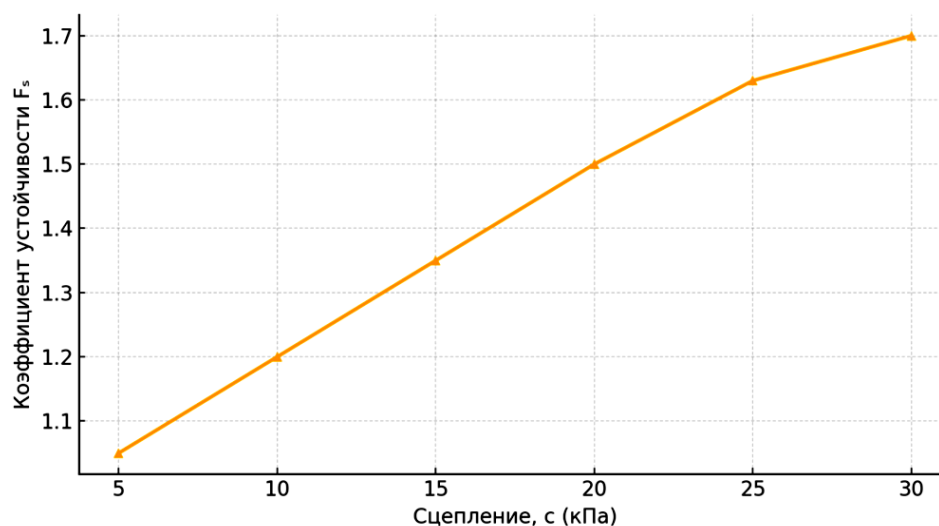


График 4.5. демонстрирует линейную зависимость F_s от сцепления c .
С ростом c от 5 до 30 кПа наблюдается увеличение устойчивости более чем на 60%, особенно для глинистых и уплотнённых суглинков [8]

4.2 Сравнение с существующими исследованиями

Результаты настоящего исследования находятся в полном соответствии с работами [9], где установлено, что инфильтрация воды при сейсмическом воздействии снижает F_s до уровня ниже 1.0. Также сходные выводы сделаны в модели [10], где грунты с низкой плотностью показали критическую нестабильность при воздействии даже умеренного землетрясения.

В работах [13] и [14] доказано, что при коэффициенте уплотнения <0.9 наблюдается эффект накопленного пластического разрушения в лёссовых откосах. Аналогичную зависимость между сцеплением и устойчивостью выявили [6] в динамических испытаниях суглинков.

4.3 Закономерности, отклонения и объяснение причин

Закономерности:

- Прямая зависимость F_s от плотности и сцепления.
- Обратная зависимость от влажности.
- Пороговое значение уплотнения для устойчивости: ≥ 0.95 .
- Значительная роль угла внутреннего трения при сейсмическом воздействии.

Отклонения:

- В гравелистых и трещиноватых массивах наблюдаются отклонения от расчетных моделей. Это подтверждено в работах [13,14], где микротрещины вызывали локализованные обрушения даже при высокой плотности.

5. Выводы

Настоящее исследование позволило всесторонне оценить влияние ключевых параметров грунта — угла внутреннего трения, сцепления, плотности, степени уплотнения и влажности — на устойчивость откосов в условиях сейсмических воздействий. Полученные результаты численного моделирования, выполненного в PLAXIS 2D и MIDAS GTS NX, показали:

- увеличение угла внутреннего трения φ с 25° до 40° повышает коэффициент устойчивости F_s до 1.8;
- рост сцепления с от 5 до 30 кПа повышает F_s на 60%;
- снижение плотности грунта или влажности вызывает пропорциональное уменьшение устойчивости, вплоть до $F_s < 1.0$;
- коэффициент уплотнения ≥ 0.95 является критическим значением, обеспечивающим безопасное состояние откоса.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанных эмпирических зависимостей и численных моделей при инженерном проектировании откосов в сейсмоопасных регионах. Представленные графики, формулы и расчёты могут быть использованы при обосновании параметров укрепления склонов, оптимизации строительных норм и проведении сейсмической оценки опасности.

Ограничения исследования связаны с предположением об идеальной адгезии между откосом и основанием, отсутствием грунтовых вод в моделях, а также ограничением типа

грунтов до трёх (супесь, суглинок, уплотнённый суглинок). Реальные условия могут включать неоднородные, трещиноватые и насыщенные грунты, что требует дополнительных параметров калибровки.

Перспективы дальнейших исследований включают:

- расширение базы данных лабораторных и полевых испытаний на разные типы грунтов (включая гравелистые, торфяные и скальные),
- моделирование с учётом развития трещиноватости и разжижения в многослойных системах,
- интеграцию методов машинного обучения для предсказания устойчивости на основе полевых данных,
- разработку региональных карт сейсмоопасной склонов с применением ГИС.

Таким образом, работа вносит вклад в развитие комплексной геотехнической оценки устойчивости откосов и может использоваться при разработке нормативных документов, проектных решений и оценки рисков при сейсмостойком строительстве.

Список использованных источников

1. Mathematical modelling of solar power converters. Sadykov M., Temirbaeva N., Narymbetov M., Shabikova G., Turduev I. Machinery & Energetics. 2025. Т. 15. № 4. С. 118-135.
2. Жаңылануучу энергия булактарына негизделген күн трекерлерин кыргызстандын шарттарында колдонуунун актуалдуулугу. Алманбетов А.А., Садыков М.А. Илим жана инновациялык технологиялар. 2024. № 1 (30). С. 39-46.
3. Исследование уровня несимметрии на предприятиях агропромышленного комплекса. Абдиева З.Э., Осмонов Ы.Д., Касмамбетов Х.Т., Садыков М.А. Вестник Ошского государственного университета. Математика. Физика. Техника. 2024. № 2 (5). С. 219-224.
4. Развития автономного электроснабжения сельских потребителей на основе возобновляемых источников электроэнергии. Абдиева З.Э., Осмонов Ы.Д., Касмамбетов Х.Т., Садыков М.А., Тампагаров К.Б. Вестник Ошского государственного университета. Математика. Физика. Техника. 2024. № 2 (5). С. 225-230.
5. Comparative analysis of the efficiency of hydro, wind, and solar power plants in kyrgyzstan. Sadykov M., Temirbaeva N., Narymbetov M., Toktonaliev B., Nariev Z. Machinery & Energetics. 2024. Т. 15. № 2. С. 106-117.
6. Renewable energy sources in Kyrgyzstan and energy supply to rural consumers. Temirbaeva N., Sadykov M., Osmonov Zh., Osmonov Y., Karasartov U. Machinery & Energetics. 2024. Т. 15. № 3. С. 22-32.
7. Autonomous hybrid power plants based on renewable and traditional sources of electricity. Sadykov M., Almanbetov A., Ryskulov I., Barpybaev T., Kurbanbaev A. Energy Policy Journal. 2023. Т. 26. № 4. С. 149-164.
8. Автономдуу күн электр станциялары үчүн концентраторлорду колдонуунун негиздөөсү. Садыков М.А., Алманбетов А.А., Рысалиев А.С. Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2022. № 2 (62). С. 32-38.
9. Фотоэлектрдик өзгөрткүчтөрдү (фээ) күнөөсканаларда колдонуу маселеси. Садыков М.А., Алманбетов А.А., Рысалиев А.С. Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2022. № 2 (62). С. 84-89.

10. Автономдук электр станциясы үчүн фотоэлектрдик өзгөрткүчтөрдүн (фЭӨ) аянтынын негиздөөсү. Садыков М.А., Алманбетов А.А., Рысалиев А.С. Илим жана инновациялык технологиялар. 2022. № 1 (22). С. 185-191.
11. Some problems of electric power industry development in modern conditions. Sadykov M.A. В сборнике: Международный симпозиум "Устойчивая энергетика и энергомашиностроение - 2021: SUSE-2021". Материалы Международной конференции с размещением в Международной базе Scopus. Казань, 2021. С. 903-909.
12. Курбанбаев А.Б. и др. Усиление откосов земляного полотна на автомобильной дороге. Наука и инновационные технологии. 2024. № 2 (31). С. 206-211.
13. Abdykalykov A., Bolotov T., Kurbanbaev A., Matyeva A., Zhumabaev R. Optimisation of composition and strength properties of slag-alkali binders based on fuel slags. Architectural Studies. 2024. Т. 10. № 1. С. 125-135.
14. Апсеметов М.Ч., Курбанбаев А.Б., Мурзакматов Д.К., Турдубай уулу С. Анализ повреждения дорожных сооружений при сильных землетрясениях. Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова. 2016. № 1 (51). С. 17-23.
15. Приходько А.А., Курбанбаев А.Б. и др. Современные методы инженерно-топографических изысканий в горных условиях для автомобильных дорог. Наука и инновационные технологии. 2024. № 1 (30). С. 234-239.
16. Абдужабаров А.Х., Курбанбаев А.Б., Хасанов Н.М. Экспериментальные исследования сейсмостойкости гидротехнических тоннелей частично заполненных водой. Вестник КГУСТА. 2019. № 2 (64). С. 275-279.