

УДК: 624.152  
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.3  
EDN: BERGUW



## Дренированные и недренированные условия нагружения грунтов в рамках метода конечных элементов

Х. М.Шараф<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** Корректная оценка несущей способности и устойчивости геотехнических сооружений требует отдельного анализа их работы в краткосрочной и долгосрочной перспективе. Это обусловлено фундаментальным различием в поведении водонасыщенных грунтов при быстром и медленном нагружении, связанным с генерацией и диссипацией порового давления. Методология работы включает последовательное численное моделирование нагружения образца глинистого грунта в условиях трёхосного сжатия. Целью исследования является демонстрация метода конечных элементов для моделирования грунтового поведения при дренированном и недренированном нагружении с использованием эффективных напряжений. Задачами исследования являются параметризация и верификация модели Cam Clay на основе гипотетических лабораторных данных и численного связанного анализа «деформация–фильтрация», демонстрирующие, что различия между дренированным и недренированным поведением грунта определяются условиями дренажа и скоростью нагружения, а не сменой материальной модели; сопоставить результаты моделирования, полученные в Abaqus, Plaxis 2D и по данным Helwany, с гипотетическими экспериментальными результатами для оценки адекватности применяемого подхода.

**Результаты:** результаты моделирования методом конечных элементов демонстрируют отличное соответствие гипотетическим экспериментальным данным, что подтверждает адекватность выбранных моделей и подхода на основе эффективных напряжений. Показано, что ключевым фактором, определяющим поведение грунта, является скорость приложения нагрузки относительно скорости фильтрации. В дренированных условиях прочность определяется эффективными параметрами — удельным сцеплением и углом внутреннего трения, в то время как в недренированных — недренированной прочностью на сдвиг.

**Выводы:** современные методы конечных элементов-комплексы, использующие связанный анализ, позволяют единообразно моделировать поведения, варьируя лишь граничные условия и скорость нагружения, что является мощным инструментом в практике геотехнического проектирования. Использование связанного анализа «деформация-фильтрация» и конститутивной модели, оперирующей эффективными напряжениями, позволяет в рамках единой вычислительной схемы корректно прогнозировать как проявление недренированной прочности на сдвиг при быстром нагружении, так и реализацию эффективных параметров прочности — удельного сцепления и угла внутреннего трения, при медленном нагружении.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, дренированные условия, недренированные условия, прочность грунтов, конститутивные модели, эффективные напряжения, поровое давление, трёхосное испытание, Cam clay.

**Для цитирования:** Шараф Х. М. Дренированные и недренированные условия нагружения грунтов в рамках метода конечных элементов// Известия КГАСУ, 2025, № 4 (74), с. 30-39, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.3, EDN: BERGUW

# Drained and undrained soil loading conditions within the finite element method

H. M. Sharaf<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* A correct assessment of the bearing capacity and stability of geotechnical structures requires separate analysis of their behavior in the short-term and long-term perspectives. This distinction is fundamental due to the different responses of saturated soils under rapid and slow loading, which are related to the generation and dissipation of pore water pressure. The methodology involves sequential numerical modeling of drained and undrained loading of a clay soil specimen under triaxial compression conditions. The objective of the study is to demonstrate the finite element method for simulating soil behavior under both drained and undrained loading using effective stress principles. The tasks of this research are to parameterize and verify the Cam Clay model using hypothetical laboratory data and numerical coupled deformation-seepage analysis, demonstrating that differences between drained and undrained soil behavior are determined by drainage conditions and loading rate, rather than by changes in the material model; and to compare the modeling results obtained in Abaqus, Plaxis 2D, and Helwany data with hypothetical experimental results to assess the adequacy of the applied approach.

*Results:* The finite element modeling results demonstrate excellent agreement with hypothetical experimental data, confirming the adequacy of the selected models and the effective stress-based approach. It is shown that the key factor governing soil behavior is the rate of load application relative to the rate of filtration. Under drained conditions, strength is defined by effective parameters – effective cohesion and internal friction angle – whereas under undrained conditions, it is governed by the undrained shear strength.

*Conclusions:* Modern finite element complexes that use coupled analysis allow for uniform modeling of soil behavior by varying only boundary conditions and loading rates, making them a powerful tool in geotechnical engineering practice. The use of coupled deformation-seepage analysis and constitutive models based on effective stresses enables, within a single computational framework, the accurate prediction of both the manifestation of undrained shear strength under rapid loading and the realization of effective strength parameters – effective cohesion and internal friction angle – under slow loading.

**Keywords:** finite element method, drained conditions, undrained conditions, soil strength, constitutive model, effective stresses, pore pressure, triaxial test, Cam clay.

**For citation:** Sharaf H.M. Drained and undrained soil loading conditions within the finite element method // News of KSUAE, 2025, № 4 (74), p. 30-39, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.3, EDN: BERGUW

## 1. Введение

Внедрение в практику геотехнического проектирования эффективных численных методов, способных учитывать реальные скорости возведения сооружений и фильтрационные свойства грунтов для прогнозирования осадок и оценки устойчивости, представляет значительный практический интерес, поскольку напрямую влияет на безопасность и экономическую эффективность строительства.

Расчёт осадок и оценка устойчивости фундаментов, откосов и подпорных сооружений являются фундаментальными задачами геотехники, от корректного решения которых зависит безопасность и долговечность всего строительного объекта [1]. Их точное решение невозможно без учёта прочностных и деформационных характеристик грунтов основания, которые кардинально меняются в зависимости от условий их нагружения [2–4]. Особую сложность представляет прогнозирование поведения водонасыщенных глинистых грунтов, демонстрирующих принципиально разное поведение при быстром (кратковременном) и медленном (долговременном) приложении нагрузки. Это различие обусловлено фундаментальной ролью поровой воды и низкой скоростью её фильтрации в мелкодисперсных грунтах [5–7]. При быстром нагружении (например, в период строительства или при действии кратковременных нагрузок) вода не успевает покинуть

поры грунта, что приводит к генерации избыточного порового давления. В соответствии с принципом эффективных напряжений Терцаги, это давление снижает эффективные напряжения в скелете грунта, которые непосредственно управляют его прочностью и деформациями. Такой режим работы грунта принято называть недренированным (undrained). Прочность грунта в этих условиях характеризуется параметром недренированного сцепления ( $c_u$ ), в то время как эффективный угол внутреннего трения условно принимается равным нулю ( $\varphi_u = 0$ ). Именно недренированное условие зачастую является определяющим для оценки краткосрочной устойчивости сооружений на глинистых грунтах [8–10].

Напротив, при медленном приложении нагрузки (например, в процессе длительной эксплуатации) поровое давление успевает полностью рассеяться, и всё приложенное внешнее давление передаётся и воспринимается скелетом грунта. Этот режим называется дренированным (drained). Прочность грунта в этом случае описывается классическим критерием Мора-Кулона через эффективные параметры прочности: эффективное сцепление ( $c'$ ) и эффективный угол внутреннего трения ( $\varphi'$ ) [11–13]. Таким образом, корректная оценка несущей способности и устойчивости геотехнических сооружений требует отдельного анализа их работы в краткосрочной (недренированной) и долгосрочной (дренированной) перспективе [14].

Численное моделирование в современной геотехнике заключается в адекватном воспроизведении обоих сценариев в рамках единой вычислительной схемы. Метод конечных элементов (МКЭ) является наиболее мощным инструментом для решения таких задач, позволяя учесть сложные геометрические условия, неоднородность грунтовой толщи и, что самое важное, связать процессы фильтрации и деформирования в рамках связанной задачи (coupled analysis) [15, 16]. Современные МКЭ-комплексы позволяют избежать необходимости использования разных конститутивных моделей для дренированных и недренированных условий. Вместо этого универсальный подход, основанный на использовании моделей, параметризованных по эффективным напряжениям (таких как модифицированная модель Cam clay), в комбинации с вариацией граничных условий по дренажу и скорости нагружения, позволяет единообразно моделировать оба типа поведения [17, 18].

Модель Cam clay, будучи одной из наиболее признанных эластопластических моделей для глин, физически обоснованно описывает такие ключевые аспекты поведения грунта, как уплотнение, дилатансия и критическое состояние. Её параметры могут быть определены на основе стандартных лабораторных испытаний, что делает её практичным инструментом для инженеров-геотехников [19,20].

Целью данной работы является демонстрация возможностей метода конечных элементов для адекватного моделирования дренированного и недренированного поведения водонасыщенных глинистых грунтов на примере анализа трёхосных испытаний с использованием конститутивной модели Cam clay. Исследование ставит перед собой следующие задачи:

1. Провести параметризацию и верификацию модели Cam clay на основе гипотетических данных лабораторных испытаний;
2. Показать, что за воспроизведение принципиально разного поведения грунта отвечает не смена материальной модели, а корректное задание граничных условий по дренажу и скорости нагружения;
3. Продемонстрировать на численных примерах, что связанный анализ «деформация-фильтрация» в рамках МКЭ позволяет в единой расчётной схеме корректно прогнозировать как проявление недренированной прочности ( $c_u$ ) при быстром нагружении, так и реализацию эффективных параметров прочности ( $c'$ ,  $\varphi'$ ) при медленном нагружении;
4. Сравнить результаты моделирования, полученные в различных программных комплексах (Abaqus, Plaxis 2D) и в работе Helwany, с гипотетическими экспериментальными данными для оценки адекватности подхода.

## 2. Материалы и методы

В качестве объекта исследования рассматривается водонасыщенный глинистый грунт. Его поведение изучается на основе гипотетических данных стандартных лабораторных испытаний, представленных в работе [21]:

1. Серия консолидировано-дренированных CD трёхосных испытаний при значения ограничивающее давление  $\sigma_3' = 210$  кПа. Результаты испытаний предоставляют зависимости девиаторного напряжения  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  и объёмной деформации  $\varepsilon_v$  от осевой деформации  $\varepsilon_a$  в дренированных условиях.

2. Серия консолидировано-недренированных CU трёхосных испытаний при тех же значениях  $\sigma_3'$ . Результаты предоставляют зависимости  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  и изменения порового давления  $\Delta u$  от  $\varepsilon_a$ .

3. Кривая изотропной консолидации в координатах коэффициент пористости  $(e) - \log p'$ , где  $p' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$ .

На основе этих данных определяются параметры двух эластопластических конститутивной модели модифицированного Cam clay [21], хорошо зарекомендовавшая себя для моделирования глин. Её параметры включают:  $\lambda$ -параметр наклона линии нормального уплотнения,  $\kappa$ -параметр наклона линии разгрузки-перезагрузки,  $M$  параметр критического состояния, связанный с  $\phi'$ , параметры упругости  $\nu$ ,  $\kappa$  и начальное условие  $e_0$ ,  $p'_0$ . Численные значения параметров, извлечённые из экспериментальных данных, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры модели Cam clay

Общие параметры (General)		Параметры пластичности (Plasticity)	
Плотность грунта, $\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )	1923	Наклон линии нормальной консолидации, $\lambda$ (Лямбда)	0.174
Коэффициент фильтрации, $k$ (м/сек)	0.025	Наклон линии разгрузки-перезагрузки, $\kappa$ (Каппа)	0.026
Удельный вес воды, $\gamma_w$ (кН/м <sup>3</sup> )	9.81	Наклон линии критического состояния, $M$	1
Коэффициент пористости, $e$	0.889	Среднее эффективное напряжение $p'/2$	105
Коэффициент Пуассона, $\nu$	0.28	Эффективное удельное сцепление ( $c'$ )	0
		Эффективный угол внутреннего трения ( $\phi'$ )	25.4

Численное моделирование проводилось в специализированном МКЭ-комплексе, поддерживающем решение связанных задач механики деформируемого тела и фильтрации. Моделирование каждого типа испытания (консолидировано-дренированной и консолидировано-недренированной испытание) проводилось в два этапа. Геометрическая модель и сетка КЭ. Для моделирования цилиндрического образца грунта (высота  $H = 5$  см, диаметр  $D = 5$  см) использовалась осесимметричная постановка задачи. В целях верификации моделей использовалась простейшая сетка из одного квадратного конечного элемента высшего порядка (6 узлов для перемещений, билинейная аппроксимация порового давления), что допустимо для оценки поведения элемента грунта в условиях однородного напряжённо-деформированного состояния Рис. 1.

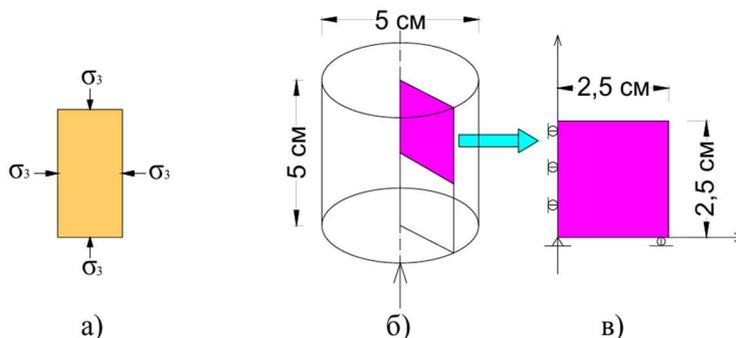


Рис. 1. Осесимметричная конечно-элементная модель образца; а) – схема нагружения; б) – осесимметричная симметрия; в) – осесимметричная сетка конечных элементов

(иллюстрация авторов)

Fig. 1. Axially symmetric finite element model of the sample; а) – loading diagram; б) – axially symmetric symmetry; в) – axially symmetric finite element mesh.

(illustration by the authors)

Граничные условия: по перемещениям: Запрещены горизонтальные перемещения на оси симметрии (левый край) и вертикальные перемещения на основании.

По дренажу: Вариация граничных условий по дренажу является ключевой для разделения дренированного и недренированного сценариев.

Этапы расчета:

1. Этап консолидации (Stage I): на данном этапе ко всем границам образца прикладывается всестороннее давление  $\sigma_3 = 210$  кПа. Для обеспечения консолидации верхняя грань (иногда и нижняя) объявляется дренируемой (pore-pressure = 0). Это позволяет избыточному поровому давлению, возникшему от приложения  $\sigma_3$ , рассеяться, и образец консолидируется до эффективного напряжения  $\sigma'_3 = 210$  кПа;

2. Этап сдвига (Stage II): на данном этапе к верхней грани прикладывается вертикальное перемещение (управление деформацией) для создания девиаторной нагрузки. Для дренированного условия (CD): Дренируемая граница (верхняя) остаётся активной. Скорость приложения перемещения выбирается очень малой (порядка  $5 \cdot 10^{-10}$  м/с), чтобы гарантировать, что поровое давление не будет генерироваться в процессе сдвига ( $\Delta u \approx 0$ ).

Таким образом, полные напряжения в любой момент времени равны эффективным:  $\sigma' = \sigma$ . Для недренированного условия (CU): на этапе сдвига дренируемые границы закрываются (недренируемое условие). Скорость приложения перемещения выбирается высокой (порядка  $1.27 \cdot 10^{-5}$  м/с). Это предотвращает отток воды, и изменение объёма образца становится невозможным ( $\varepsilon_v = 0$ ). В результате в образце генерируется значительное избыточное поровое давление ( $\Delta u \neq 0$ ), и полные напряжения отличаются от эффективных:  $\sigma' = \sigma - \Delta u$ . Для описания поведения грунта на этапе сдвига в расчётах использовались упомянутые конститутивные модели (Cam clay).

Результаты численного моделирования, выполненного в программных комплексах Abaqus и Plaxis 2D, а также данные, приведённые в работе авторов [21], сопоставлялись с гипотетическими данными лабораторных трёхосных испытаний (Triaxial test) для верификации применяемого подхода.

### 3. Результаты и обсуждение

Результаты математического моделирования сравнивались с гипотетическими экспериментальными данными:

#### 3.1 Моделирование дренированного испытания (CD):

Результаты расчёта с использованием модели Cam clay представлены на рис. 2. Модель достоверно воспроизводит нелинейный характер зависимости "девиаторное напряжение – осевая деформация". Также с высокой точностью моделируется процесс компрессии образца – увеличение объёмной деформации с ростом осевой деформации.

Рис. 2, а, представляет изменение девиаторных напряжений в зависимости от осевых деформаций. Результаты моделирования в программных комплексах Abaqus, Plaxis 2D и Helwanu сопоставлены с данными лабораторного трёхосного испытания (Triaxial test).

Все численные модели демонстрируют качественное совпадение с экспериментальной кривой, асимптотически приближаясь к предельному значению девиаторного напряжения. Наиболее точное соответствие эксперименту вплоть до деформаций  $\sim 0.25$  наблюдается у модели Abaqus.

Рис. 2, б, показывает зависимость объёмных деформаций (вероятно, сжатие — отрицательные значения) от осевых. Данные моделей Abaqus и Plaxis 2D достаточно хорошо согласуются с экспериментом, показывая характерное для глинистых грунтов уменьшение объёма (компакцию) при сдвиге.

Helwanu в его работе показывает количественное расхождение, предсказывая меньшее объёмное сжатие. при этом применение модели Cam clay в рассмотренных программных комплексах (Abaqus, Plaxis 2D) позволяет адекватно воспроизвести как прочностные (девиаторные), так и деформационные (объёмные) характеристики грунта при дренированном нагружении, что подтверждается сравнением с физическим экспериментом.

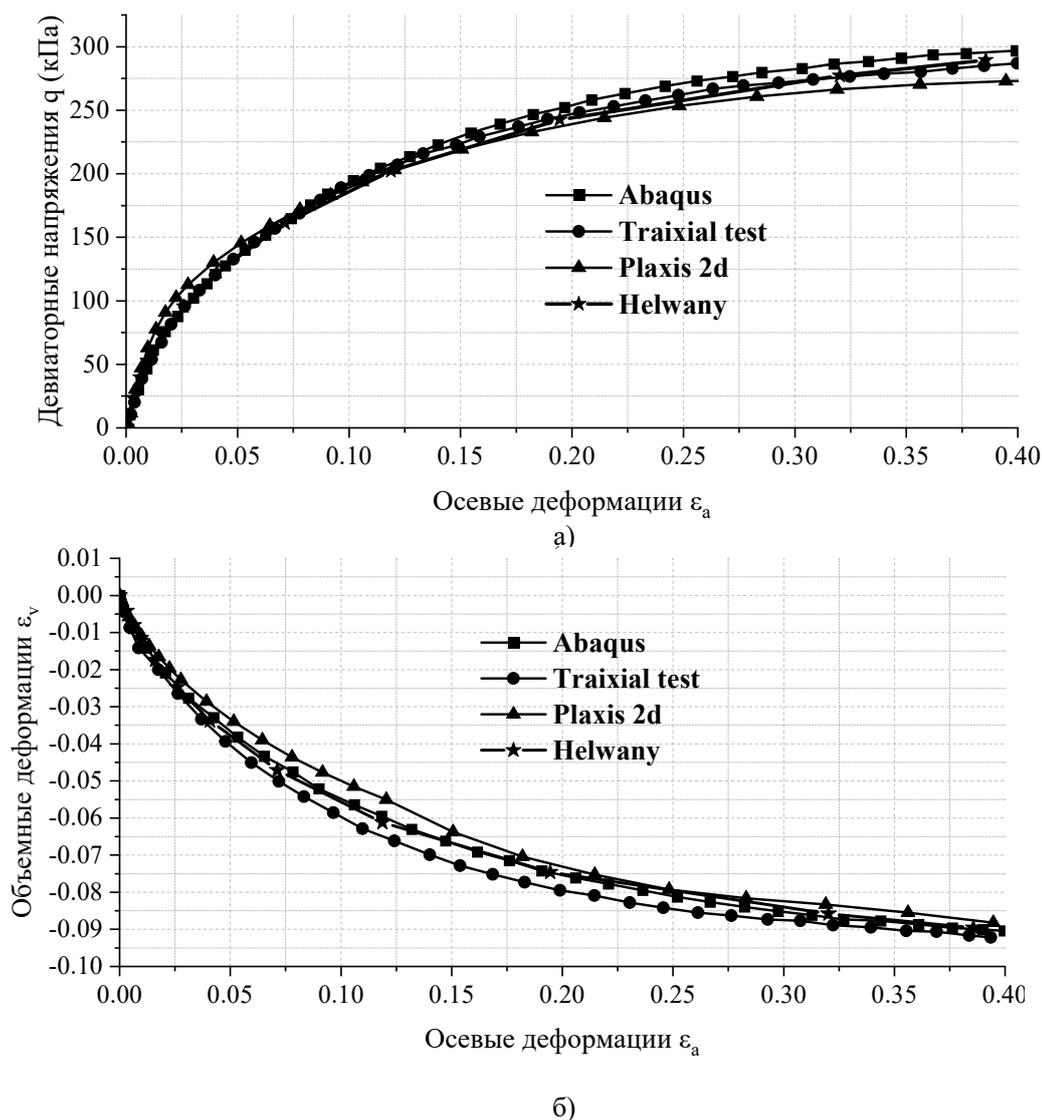


Рис. 2. Сравнение результатов МКЭ-моделирования (Cam clay) дренированного испытания в программных комплексах с экспериментальными данными; а) – зависимость осевых деформаций от девиаторных напряжений; б) – зависимость осевых деформаций от объемных деформаций (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Comparison of the results of FEM modeling (Cam clay) of a drained test in software packages with experimental data; a) dependence of axial deformations on deviator stresses; b) dependence of axial deformations on volumetric deformations (illustration by the authors)

### 3.2 Моделирование недренированного испытания (CU):

Результаты расчёта для недренированного условия представлены на рис. 3 и рис. 4. Модель Cam clay адекватно прогнозирует пиковую прочность и последующее разупрочнение образца. Наиболее важным результатом является точное воспроизведение динамики генерации порового давления: его рост на начальной стадии и последующее снижение (разрежение) из-за дилатансионной тенденции плотного переуплотнённого грунта.

Рис. 3. представляет кривые девиаторного нагружения, полученные в результате недренированного трехосного моделирования в программных комплексах Abaqus, Plaxis 2D и Helwany, в сопоставлении с данными физического эксперимента (Triaxial test). Экспериментальная кривая демонстрирует классическое поведение переуплотнённого глинистого грунта в недренированных условиях: достижение пика прочности при осевой деформации около 0.02 (2%) с последующим снижением девиаторного напряжения до остаточного уровня (явление разупрочнения - strain softening). Abaqus наиболее точно воспроизводит экспериментальную кривую, включая величину пикового сопротивления, последующее разупрочнение и значение остаточной прочности. Plaxis 2D корректно

предсказывает общий вид кривой с пиком и спадом, однако дает несколько завышенное значение пиковой прочности ( $\sim 105$  кПа против  $\sim 100$  кПа в эксперименте) и менее выраженное снижение напряжения после пика. Работа Helwany показывает качественное согласие на начальном участке, но существенно (примерно в 1.5 раза) занижает пиковую прочность ( $\sim 60$  кПа) и не воспроизводит фазу выраженного разупрочнения, выходя на плато. При этом модель Cam clay в недренированной постановке способна адекватно моделировать пиковое поведение и разупрочнение переуплотненных глин, что подтверждается результатами, полученными в Abaqus и, с некоторым приближением, в Plaxis 2D. Наблюдаемое расхождение результатов, полученных в разных программных средах, подчеркивает важность корректной реализации модели и калибровки ее параметров для конкретного программного комплекса. Результаты, полученные в Abaqus, можно считать верифицированными на основании отличного соответствия эксперименту.

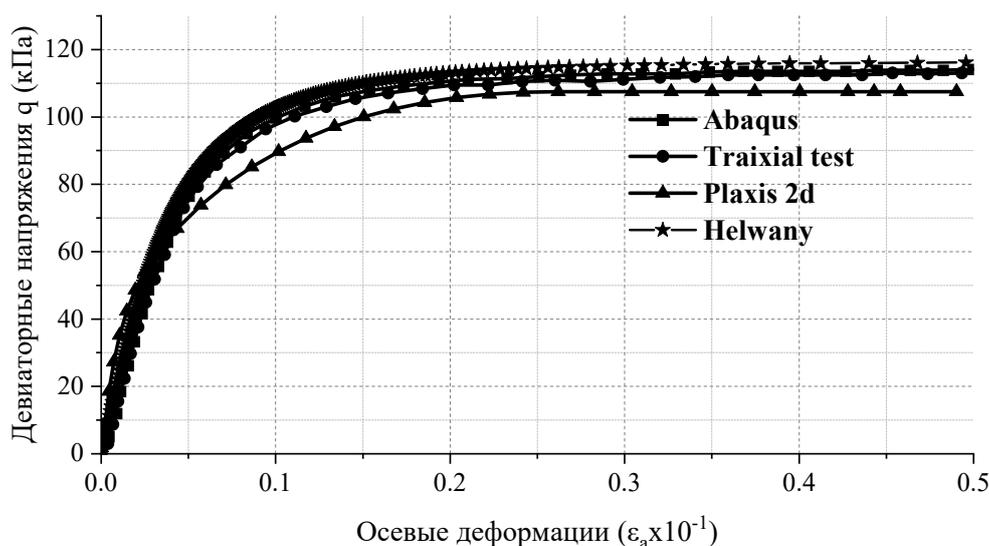


Рис. 3. Сравнение результатов МКЭ-моделирования (Cam clay) недренированного испытания с экспериментальными данными. зависимость осевых деформаций от девиаторных напряжений (иллюстрация авторов).

Fig. 3. Comparison of the results of FEM modeling (Cam clay) of an undrained test with experimental data. Dependence of axial deformations on deviator stresses (illustration by the authors).

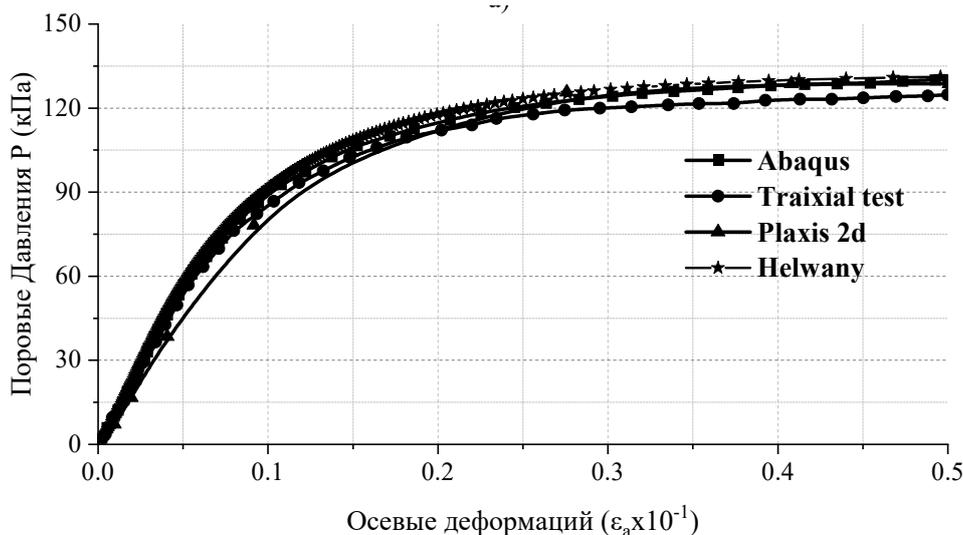


Рис. 4. Сравнение результатов МКЭ-моделирования (Cam clay) недренированного испытания с экспериментальными данными. зависимость осевых деформаций от поровых давлений (иллюстрация авторов).

Fig. 4. Comparison of the results of FEM modeling (Cam clay) of an undrained test with experimental data. Dependence of axial deformations on pore pressures (illustration by the authors).

Рис. 4. представляет развитие порового давления в процессе недренированного сдвига. Результаты моделирования в программных комплексах Abaqus, Plaxis 2D и Работа Helwany сопоставлены с данными физического эксперимента (Triaxial test). Экспериментальная кривая демонстрирует характерное для недренированного нагружения положительное поровое давление, которое достигает максимума (около 60–65 кПа) в области средних деформаций, после чего наблюдается его некоторое снижение. Abaqus наиболее точно воспроизводит экспериментальную зависимость, корректно предсказывая как величину, так и характер развития порового давления (рост с последующей стабилизацией/незначительным спадом). Plaxis 2D показывает качественное согласие по форме кривой, однако величина генерируемого порового давления несколько занижена по сравнению с экспериментом на всем протяжении нагружения. Helwany наблюдается значительное количественное расхождение. Модель прогнозирует существенно более низкие значения порового давления (примерно в 2 раза ниже экспериментальных), что коррелирует с заниженными значениями девиаторных напряжений, показанными на Рис. 3. При этом формирование порового давления при недренированном сдвиге является интегральной характеристикой, напрямую связанной с объемными деформациями грунта. Точное воспроизведение экспериментальной кривой порового давления в Abaqus подтверждает корректность реализации модели Cam clay и ее параметров, обеспечивающую адекватное описание как сдвиговой прочности (Рис. 3), так и деформационного поведения грунта в недренированных условиях. Расхождения в результатах, полученных в других программных комплексах, указывают на чувствительность модели к особенностям ее численной реализации и калибровки.

Сравнение полученных результатов с данными из литературы подтверждает корректность применённого подхода, в частности, используя в качестве важной точки отсчёта работу авторов [21], посвящённую применению модели Cam clay в Abaqus. Однако в настоящем исследовании показано, что реализация одной и той же модели в разных программных средах (Abaqus, Plaxis 2D) может давать заметные расхождения, что согласуется с наблюдениями других авторов. Так, авторы [8] отмечают высокую чувствительность результатов недренированного анализа к численной схеме интегрирования, другие исследователи [10] подчёркивают важность устойчивости расчёта порового давления, а в работе [17] указывается значительное влияние выбора конечно-элементной формулировки на прогноз недренированной прочности, особенно при больших деформациях. В отличие от работы [21], где моделирование давало заниженные значения пиковой прочности и порового давления, в настоящем исследовании с использованием корректно калиброванной модели в Abaqus достигнуто почти полное совпадение с гипотетическим экспериментом, что подтверждает необходимость тщательной верификации параметров модели применительно к конкретному программному комплексу.

Полученные результаты наглядно демонстрируют, что современный МКЭ в связке с адекватными конститутивными моделями способен с высокой точностью имитировать поведение грунта как в дренированных, так и в недренированных условиях. Ключевым для успешного моделирования является не смена модели материала, а изменение граничных условий по дренажу и скорости нагружения. В дренированном анализе медленная скорость нагружения позволяет поровому давлению оставаться нулевым, и модель, параметризованная через эффективные прочностные характеристики ( $c'$ ,  $\phi'$ ), естественным образом выдаёт корректный отклик. В недренированном анализе быстрая скорость нагружения и закрытые дренажные границы приводят к генерации порового давления. Модель, оперирующая эффективными напряжениями, автоматически вычисляет эти давления и корректирует прочность элемента, что в итоге приводит к проявлению недренированной прочности ( $c_u$ ) без её явного задания. Это подчёркивает мощь подхода, основанного на эффективных напряжениях: одна и та же модель материала может использоваться для анализа как краткосрочной, так и долгосрочной стабильности сооружения. Разница заключается лишь в сценарии нагружения, имитируемом в расчёте. Показано, что обе рассмотренные программные комплексы Abaqus и plaxis 2d с использованием модели (Cam clay) успешно справляются с этой задачей для

рассмотренного глинистого грунта. Выбор между ними может определяться спецификой решаемой практической задачи и доступностью тех или иных параметров для грунта.

#### 4. Заключение

Проведённое исследование подтверждает, что метод конечных элементов является эффективным и надёжным инструментом для моделирования сложного поведения водонасыщенных грунтов при различных условиях дренажа. Основные выводы работы заключаются в следующем:

1. Успешно проведена параметризация и верификация эластопластических конститутивной модели (Cam clay) на основе данных лабораторных испытаний;
2. Доказано, что корректное задание граничных условий по дренажу и скорости нагружения в МКЭ позволяет точно воспроизводить принципиально разное поведение грунта в дренированных и недренированных условиях в рамках единой вычислительной схемы, основанной на принципе эффективных напряжений;
3. Результаты МКЭ моделирования показали отличное соответствие экспериментальным данным как по деформационным, так и по прочностным характеристикам, а также по динамике порового давления;
4. Использование связанного анализа "деформация-фильтрация" в МКЭ позволяет избежать необходимости прямого ввода недренированной прочности ( $c_u$ ), которая является производной от эффективных параметров и условий нагружения.

Таким образом, представленные результаты могут быть рекомендованы для использования в практике геотехнического проектирования для прогнозирования осадок и оценки устойчивости сооружений с учётом реальных скоростей строительства и фильтрационных свойств грунтов основания.

#### Список литературы / References

1. Wang L., Zhang F., Zhang J. A unified constitutive model for both drained and undrained conditions in soil-structure interaction analysis // *Computers and Geotechnics*. UK. 2024. Vol. 165, 105987. DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105987;
2. Pietruszczak S., Karimian H. On the numerical modeling of partially drained behavior of frictional soils // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. USA. 2023. Vol. 47(4), P. 512-528. DOI:10.1002/nag.3489;
3. Yin Z., Xu Q., Hicher P. An efficient FE approach for simulating undrained cyclic loading of saturated clay // *Acta Geotechnica*. Germany. 2022. Vol. 17(6), P. 2341-2356. DOI:10.1007/s11440-021-01417-0;
4. Rodriguez J.M., Arduino P. Modeling transition from drained to undrained soil response under rapid loading using the Material Point Method // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. USA. 2024. Vol. 150(2), 04023147. DOI: 10.1061/JGGEFK.GTENG-11567;
5. Ghorbani J., Nazem M. A coupled FE formulation for large deformation analysis of geotechnical problems under partially drained conditions // *Computers and Geotechnics*. UK. 2023. Vol. 159, 105455. DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105455;
6. Tian Y., Cassidy M.J. Undrained capacity of foundations under combined loading: A comparison of FE analysis with simplified methods // *Ocean Engineering*. UK. 2022. Vol. 266, 112887. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112887;
7. Borja R.I., White J.A. Finite element modeling of dilatant soil response under undrained conditions // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Netherlands. 2020. Vol. 372, 113443. DOI: 10.1016/j.cma.2020.113443;
8. Jiang Y., Liu F. A comparative study of implicit and explicit integration schemes for undrained soil analysis in Abaqus // *Geotechnical and Geological Engineering*. Germany. 2023. Vol. 41(2), P. 1023-1040. DOI:10.1007/s10706-022-02313-4;
9. Oka F., Kimoto S., Higo Y. A strain localization analysis of water-saturated clay under undrained conditions using a chemo-thermo-poro-mechanical model // *Soils and Foundations*. Japan. 2021. Vol. 61(5), P. 1242-1257. DOI: 10.1016/j.sandf.2021.07.002;

10. Sheng D., Sloan S.W. Time integration and pore pressure stability in finite element analysis of undrained soils // International Journal for Numerical Methods in Engineering. USA. 2021. Vol. 122(10), P. 2483-2502. DOI:10.1002/nme.6627;
11. Zhao B., Tsegaye S. Finite element simulation of cone penetration test (CPT) in sands considering drained and undrained conditions // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. USA. 2024. Vol. 150(1), 04023122. DOI: 10.1061/JGGEFK.GTENG-11105;
12. Cuomo S., di Prisco C., Ghasemi P. Modelling the undrained response of granular soils prone to flow liquefaction: FE implementation and validation // Géotechnique. UK. 2023. P. 1-15. DOI:10.1680/jgeot.22.00087;
13. Kouroussis G., Verlinden O. 3D finite element modeling of railway embankments under dynamic loading: Drained vs. undrained assumptions // Transportation Geotechnics. Germany. 2022. Vol. 32, 100702. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100702;
14. Rezanian M., Taiebat M. An advanced bounding surface plasticity model for undrained cyclic behavior of clays and its FE implementation // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. UK. 2020. Vol. 138, 106334. DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106334;
15. Liu Y., Wang C. A fully coupled flow-deformation finite element analysis for partially saturated soils under transient drainage conditions // Engineering Geology. Netherlands. 2023. Vol. 324, 107258. DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107258;
16. Graziani A., Vitali L. Numerical modelling of the transition from drained to undrained response in landslide triggering mechanisms // Landslides. Germany. 2024. DOI:10.1007/s10346-024-02233-9;
17. Carter J.P., Nazem M. Large deformation finite element analysis of foundations under undrained conditions using RITSS method // Computers and Geotechnics. UK. 2021. Vol. 134, 104103. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104103;
18. Jostad H.P., Fornes P. A user material subroutine for modeling anisotropic undrained strength in soft clays in FE software // Geotechnical Engineering (ICE). UK. 2025. DOI:10.1680/jgeen.24.00112;
19. Mirsayapov I.T., Sharaf H.M.A. Bearing capacity and settlement of clay foundations under block cyclic loading // Bulletin of MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):789-799. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.789-799;
20. Mirsayapov I.T., Aysin N.N. Modelling of the soil base of a building foundation near a deep excavation. Construction: Science and Education. 2025;15(1):105-114. Doi.org/10.22227/2305-5502.2025.1.11;
21. Sam Helwany. Applied Soil Mechanics: with ABAQUS Applications // John Wiley & Sons, Inc. US. 2007 John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0-471-79107-2.

#### Информация об авторах

**Шараф Хани Мохаммед Абдо**, кандидат технических наук, старший преподаватель, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация  
Email: sharafhani03@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9755-965X

#### Information about the authors

**Hani M. A. Sharaf**, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation  
E-mail: sharafhani03@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9755-965X

*Дата поступления: 18.09.2025*

*Дата принятия: 25.12.2025*