

DOI 10.53278/2306-9139-2024-2-23-3-12
УДК 624.131

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТАХ ПРИ ПРОСТОМ СДВИГЕ

A METHODOLOGY FOR STUDY OF SOIL STRAIN INSTABILITY IN SIMPLE SHEAR

© 2024 г. А. В. Шеховцова¹, А. Ю. Мирный², В. В. Фуникова³, Е. А. Вознесенский⁴

© 2024 A. V. Shekhovtsova¹, A. Y. Mirnyy², V. V. Funikova³, E. A. Voznesensky⁴

^{1,2,3,4}Геологический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова,
Ленинские горы, д. 1, Москва, 119234, Россия

^{1,2,3,4}Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia

⁴Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева (ИГЭ РАН),

Уланский пер. д. 13, стр. 2, Москва, 101000, Россия

⁴Sergeev Institute of Environmental Geoscience (IEG RAS), 13 bld 2 Ulansky lane, Moscow, 101000, Russia

shekhovtsovaav@my.msu.ru¹, mirnyyay@mail.ru², funikovavv@my.msu.ru³, eugene@geoenv.ru⁴

Аннотация. В статье рассматривается эффект возникновения деформационной неустойчивости в дисперсных грунтах и подходы к ее идентификации. Приведен краткий обзор современных представлений о неустойчивости. Предлагается новый методический подход к определению точки деформационной неустойчивости в терминах эффективных напряжений при простом сдвиге. Анализируются количественные характеристики деформационной неустойчивости в момент достижения этого состояния при разных условиях испытаний.

Abstract. The article deals with the effect of strain instability in soils and approaches to its identification. A brief review of modern concepts of instability is presented. A new methodological approach to determine the point of strain instability in terms of effective stresses in simple shear test is proposed. Quantitative characteristics of deformation instability at the moment of reaching this state under different testing conditions.

Ключевые слова: деформационная неустойчивость, точка неустойчивости, коэффициент напряжений, простой сдвиг, песчаные грунты, глинистые грунты.

Keywords: strain instability, point of instability, stress ratio, simple shear, sands, clay soils.

Введение

Вопросы устойчивости и неустойчивости различных систем исследуются уже не одно столетие. Одним из основоположников теории устойчивости в механике можно считать академика Петербургской академии наук А. М. Ляпунова, который еще в 1892 г. опубликовал работу «Общая задача об устойчивости движения»¹. В теоретической механике под устойчивостью понимается способность системы оставаться в равновесии при наличии малых внешних воздействий. Таким образом, устойчивость рассматривается как возможность функционирования многокомпонентной системы при некоторых докритических деформациях.

Грунты также являются многокомпонентными системами, поэтому изучение вопросов их устойчивости актуально и с теоретических, и с практических позиций. За начало изучения данного вопроса можно принять работы по теории неустойчивости грунтов П. Ладе конца XX века [5, 6]. В этих исследованиях под неустойчивостью подразумевалось такое поведение грунта, когда из-за невозможности структурных связей выдерживать приложенные нагрузки в нем достаточно быстро развиваются большие пластические деформации [7]. В более поздних исследованиях проявление неустойчивости стали связывать не только с деформациями грунта, но и с достигнутым уровнем напряжений,

¹ Ляпунов А. Общая задача об устойчивости движения / А. Ляпунов — Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950 — 471 с.

что также нашло отражение в определении явления: неустойчивость заключается в уменьшении прочности грунта, обусловленном развитием порового давления, снижающего эффективные напряжения и приводящего к развитию больших деформаций [15]. В данной статье под термином «деформационная неустойчивость» понимается докритическое состояние грунтов, предшествующее разрушению, которое связано с ослаблением и началом разрыва межчастичных контактов и сопутствующей перестройкой порового пространства, проявляющееся, прежде всего, в значимом увеличении скорости деформирования [2].

К настоящему времени вопросам проявления неустойчивости в грунтах посвящено достаточное количество исследований, однако в большинстве из них объектом являются песчаные грунты, исследуемые в связи с их разжижаемостью [4, 10, 16, 17, др.]. Деформационной же неустойчивости глинистых грунтов, несмотря на их большее разнообразие и широкое распространение, посвящено гораздо меньше работ. В частности, изучением деформационной неустойчивости глинистых искусственно сформированных и природных грунтов занимались как отечественные [1–3], так и зарубежные [8, 9] исследователи. В перечисленных работах моделирование напряженного состояния грунта в лабораторных условиях для изучения состояния деформационной неустойчивости проводилось в условиях трехосного сжатия, однако такие исследования можно проводить и при простом сдвиге [11, 14], причем испытания в условиях простого сдвига имеют ряд преимуществ, например, простота подготовки образцов и их меньший объем.

Исследование, выполненное авторами этой статьи, также основано на результатах лабораторных исследований в условиях простого сдвига. Момент достижения состояния деформационной неустойчивости, после которого происходит резкий рост скорости развития деформации, именуется здесь далее «точкой неустойчивости», которая количественно характеризуется а) соотношением эффективных напряжений и б) уровнем достигнутой деформации [2].

Рассмотрим некоторые методические вопросы, связанные с идентификацией точки неустойчивости. Так, при интерпретации результатов трехосных испытаний используются два критерия разрушения образца:

- достижение девиатором напряжений максимального значения;
- достижение максимума отношения главных эффективных напряжений (σ'_1/σ'_3).

При дренированных испытаниях эти два условия реализуются одновременно, однако в недренированных возникает сложность в определении момента разрушения, так как при сдвиге развивается значительное поровое давление. При этом максимальное значение девиатора напряжений достигается раньше, чем максимальное значение отношения главных эффективных напряжений [13]. При анализе результатов трехосных результатов, проведенных в недренированных условиях на песчаных грунтах, которые можно представить в поле эффективных напряжений $p' - q$,

где — средние эффективные напряжения;
 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ — девиатор,

Следует отметить, что верхняя точка траектории не связана с линией критических состояний и не соответствует моменту разрушения (рис. 1). Деформации развиваются и после достижения максимума девиатора, а увеличение деформации при уменьшении нагрузки является одним из характерных проявлений неустойчивости [3].

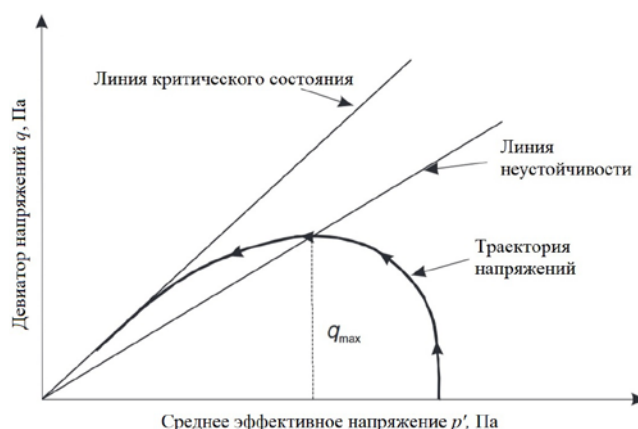


Рис. 1. Траектория эффективных напряжений, линии неустойчивости и критического состояния, выявленные в результате испытаний грунта на трехосное сжатие в недренированных условиях [12]

Аналогичные закономерности проявляются и в испытаниях образцов песчаных грунтов в поле напряжений в условиях простого сдвига $\sigma' - \tau$, где σ' — эффективное нормальное напряжение; τ — касательное напряжение) (рис. 2).

В данном случае верхняя точка траектории также не связана с линией критических состояний и не соответствует моменту разрушения [12].

Неустойчивость грунта, проявляющаяся как снижение девиатора напряжений при сдвиге — т.е. его мобилизуемой прочности, предполагает, что в поле эффективных напряжений существует некая «линия неустойчивости». Она находится ниже линии критического состояния и соответствует нижней границе области неустойчивости, которая

разделяет зоны стабильного (разрушение невозможно) и нестабильного (разрушение возможно) состояний грунта. Линия неустойчивости характеризует геометрическое положение точек неустойчивости для образцов-близнецов при разном начальном напряженном состоянии. Определение линии неустойчивости необходимо для понимания уровня нагрузок, которые могут привести к разрушению грунта, и для корректного выделения разных стадий развития деформаций.

При этом изучение деформационной неустойчивости и закономерностей ее проявления актуально не только для разжижаемых песчаных грунтов, но и для менее изученных в этом отношении связных грунтов, поскольку приближает нас к правильному пониманию природы деформируемости и прочности грунтов.

Ранее уже был разработан метод определения точки неустойчивости по результатам трехосных испытаний при статическом режиме нагружения — с монотонным возрастанием нагрузки, который основан на установлении момента достоверного повышения скорости накопления деформаций образца — выше трехсигмового диапазона ее вариаций на начальном этапе его нагружения [1, 2]. Затем эта же точка на траектории нагружения была рассмотрена через расчет величины суммарной удельной работы, совершаемой над образцом при его деформировании [1]:

$$W = \frac{1}{2}(\tau_i + \tau_{i+1}) \cdot (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i),$$

где W_i — работа, совершаемая в интервале времени от момента i до $i+1$, кДж/м³; τ_i — касательное напряжение в момент i , кПа; ε_i — относительная деформация в момент i , %.

На ее графике в функции натурального логарифма времени $\ln t$ отчетливо выделяется резкий перегиб, совпадающий с моментом достижения точки деформационной неустойчивости (рис. 3). Этот энергетический подход дает более простой, но надежный инструмент идентификации точки неустойчивости, который может использоваться и в кинематическом режиме нагружения. Он и был использован авторами при разработке методики определения параметров деформационной неустойчивости в песчаных и глинистых грунтах в условиях простого сдвига, представленной в данной статье.

Характеристика исследуемых грунтов

Методика была опробована на песчаных грунтах, модельных глинистых грунтах, а также природных глинах. Модельные грунты готовились уплотнением

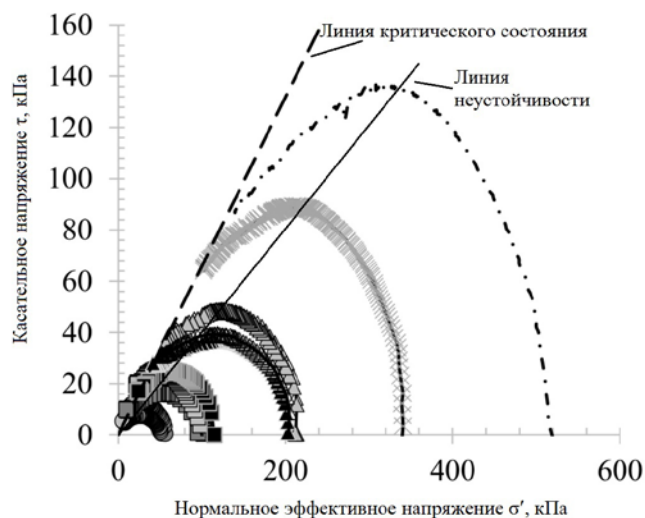


Рис. 2. Траектории эффективных напряжений, линии неустойчивости и критического состояния по результатам недренированных испытаний образцов песчаного грунта на простой сдвиг [11]

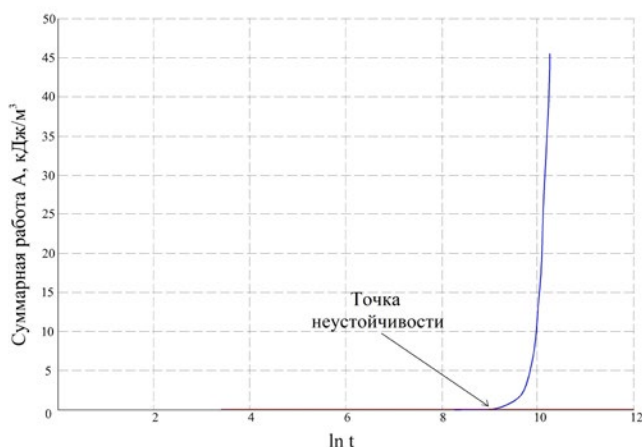


Рис. 3. Определение точки неустойчивости по величине суммарной работы деформации [2]

пасты на пределе текучести в консолидаторе при нагрузке 200 кПа в течение двух суток.

Песчаный грунт представляет собой аллювиальный песок средней крупности голоценового возраста аН из разреза первой надпойменной террасы р. Клязьмы на территории Мещерской научной станции МГУ имени М. В. Ломоносова. Исходным материалом для модельных глинистых грунтов послужила моренная супесь московского оледенения gQII_m с левого берега р. Тверец в Тверской области. Изучение природных глинистых грунтов проводилось на примере тяжелой глины аллювиального генезиса аН р. Москвы в районе Нагатинской поймы.

Характеристики образцов исследуемых грунтов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика исследуемых образцов грунтов

Название грунта по ГОСТ 25100-2020	Строение	Число пластичности I_p , ед.	Плотность грунта до опыта ρ , г/см ³	Плотность скелета грунта до опыта ρ_s , г/см ³	Коэффициент пористости до опыта e , д.е.	Влажность до опыта W , %
Песок средней крупности	Нарушенное	-	1,65–1,66 1,66	1,65–1,66 1,66	0,59–0,60 0,60	0
Супесь песчанистая	Нарушенное	0,06	2,10–2,13 2,11	1,81–1,84 1,82	0,46–0,48 0,47	15–17 16
Глина тяжелая мягкопластичная	Природное	0,31	1,64–1,73 1,70	1,09–1,16 1,13	1,40–1,49 1,43	46–50 49

Примечание: над чертой приведен диапазон между минимальным и максимальным значениями показателя; под чертой — среднее значение показателя.

Методика испытаний и идентификации точки деформационной неустойчивости при простом сдвиге

Моделирование условий простого сдвига проводилось в приборе многоплоскостного среза конструкции ГТ 1.2.16 ООО НПП «Геотек». Перед началом испытания образец грунта консолидировался при постоянной нагрузке до стабилизации вертикальных деформаций непосредственно в обойме прибора по ГОСТ 71042-2023. После достижения условной стабилизации деформаций при неизменном зафиксированном положении верхнего штампа проводилось сдвиговое нагружение с постоянной скоростью деформации. Таким образом был реализован режим испытания при постоянном объеме (ГОСТ 71042-2023 Приложение Б), эквивалентный недренированному испытанию для водонасыщенных образцов.

Для исследования влияния условий нагружения и минимизации влияния неоднородности грунта было проведено 6 серий испытаний с различными скоростями деформирования от 0,01 мм/мин до 3 мм/мин на модельной супеси.

Определение точки неустойчивости по результатам проведенных экспериментов проводилось на основании анализа суммарной работы деформации в функции натурального логарифма времени, в соответствии с подходом, описанном в работе [2]. Этот метод пригоден как для анализа испытаний с монотонным нагружением, так и с кинематическим деформированием (рис. 4а). Затем моменты достижения точки неустойчивости и разрушения идентифицировались на траектории эффективных напряжений (рис. 4б).

Точка неустойчивости при простом сдвиге достаточно отчетливо выделяется первым перегибом на траектории эффективных напряжений, отражая изменение характера поведения грунта. Она лежит на пересечении отрезков, полученных линейной аппроксимацией соседних участков траектории методом наименьших квадратов из условия максимума коэффициента детерминации R^2 . Таким образом, за точки неустойчивости можно прини-

мать точки на траектории напряжений, наиболее близкие к пересечению соответствующих аппроксимирующих отрезков прямых. Аналогичная в целом картина наблюдается и с положением точки разрушения грунта (рис. 4б).

Характер траекторий напряжений, как и контрастность указанного перегиба на ней, может различаться для песчаных и глинистых грунтов, о чем свидетельствуют результаты определения точки неустойчивости по результатам испытаний тяжелой глины (рис. 5а, 5б).

Идентифицировав точку деформационной неустойчивости, можно определить ее количественные характеристики — коэффициент напряжений, определяемый как отношение касательного напряжения τ к нормальному эффективному σ' , а также пороговую сдвиговую деформацию неустойчивости.

Рассмотрим возможную природу проявления отмеченных выше этапов деформирования. На первом этапе — до достижения точки неустойчивости — деформация грунта развивается, вероятнее всего, за счет взаимных смещений его структурных элементов с их сопутствующей переориентацией и ослаблением контактных взаимодействий, но без их массового разрушения. И именно об этом говорят описанные ранее изменения структуры порового пространства глинистых грунтов [3]. К концу этого этапа завершается формирование ослабленных зон, по которым на втором этапе сформируются зоны сдвига с постепенным накоплением числа разорванных контактов вплоть до разрушения.

На третьем же этапе разрушения все деформации грунта происходят исключительно внутри сформированных зон сдвига, количество которых связано с его структурно-текстурными особенностями. По траекториям напряжений (рис. 4, 5) видно, что до точки разрушения песчаные и глинистые грунты ведут себя сходно, однако их поведение на участке разрушения различается. Это обусловлено тем, что при разрушении глинистого грунта в образце формируются одна или несколько

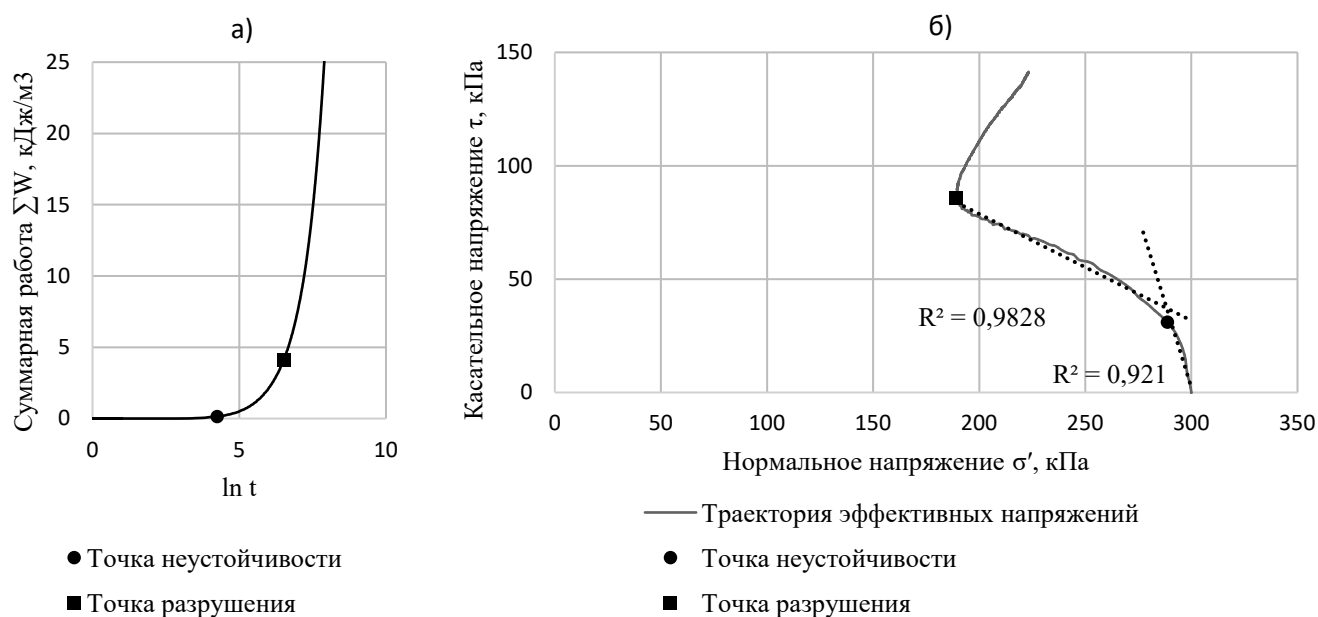


Рис. 4. Идентификация точки неустойчивости на графике суммарной работы деформации (а) и на траектории эффективных напряжений (б) по результатам простого сдвига песка средней крупности при давлении консолидации $\sigma = 300$ кПа

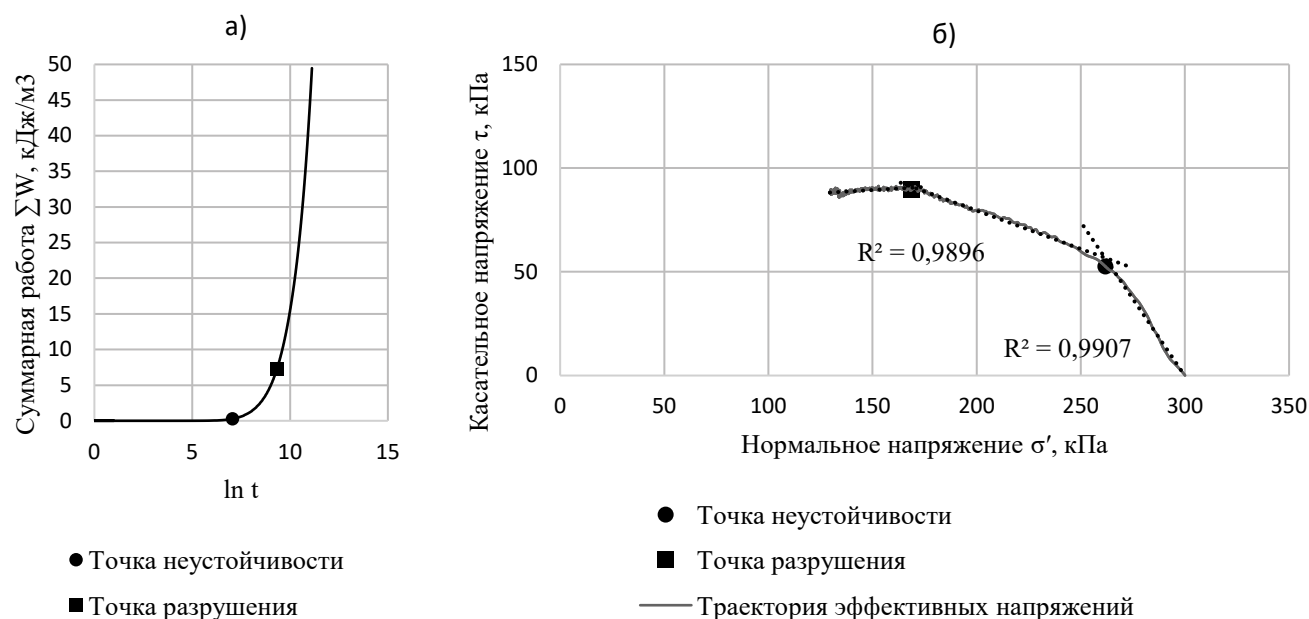


Рис. 5. Идентификация точки неустойчивости на графике суммарной работы деформации (а) и на траектории эффективных напряжений (б) по результатам простого сдвига глины тяжелой крупности при давлении консолидации $\sigma = 300$ кПа

зон прогрессирующих сдвигов, где развиваются последующие деформации, тогда как в песчаных грунтах зон сдвига множество, и за счет дилатансии в условиях постоянного объема возрастают эффективные напряжения. Можно предположить, что более быстрые переходы между описанными механизмами деформации будут проявляться на траекториях в виде более четких перегибов графика. Таким образом предлагается выделять 3 этапа сдвигообразования (рис. 6, 7).

Для дальнейшего анализа точки неустойчивости и точки разрушения наносятся на траектории эффективных напряжений соответствующих испытаний. Пример траекторий для одной серии испытаний на модельных образцах супеси при скорости деформирования 0,3 мм/мин приведен на рисунке 8. По результатам серии испытаний положение точек неустойчивости может быть удовлетворительно аппроксимировано линейной функцией — линией неустойчивости, выходящей из начала координат

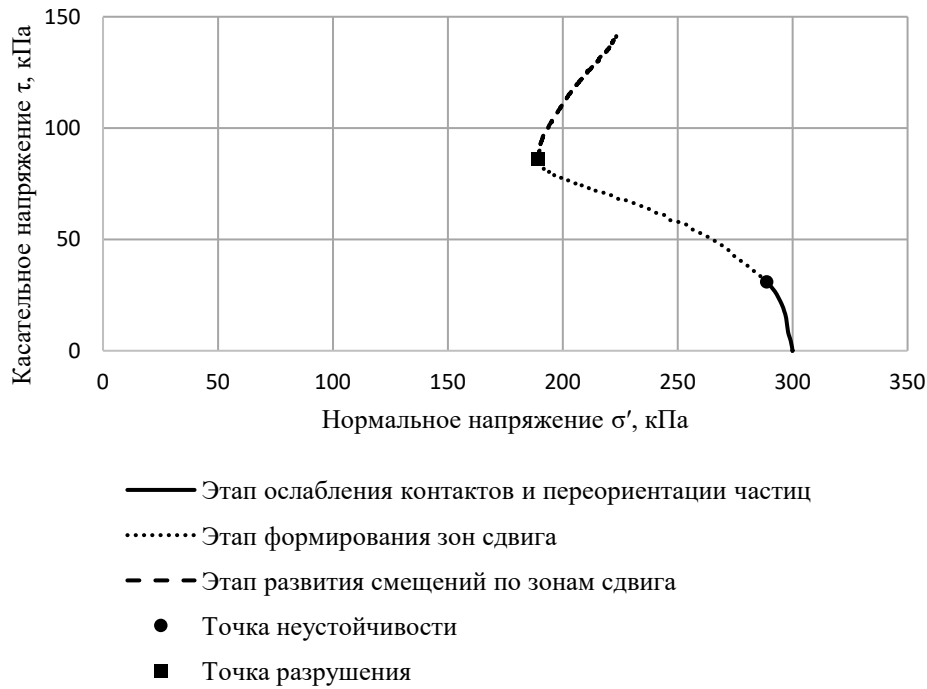


Рис. 6. Этапы сдвигообразования на траектории эффективных напряжений при испытании песка средней крупности при давлении консолидации $\sigma = 300$ кПа

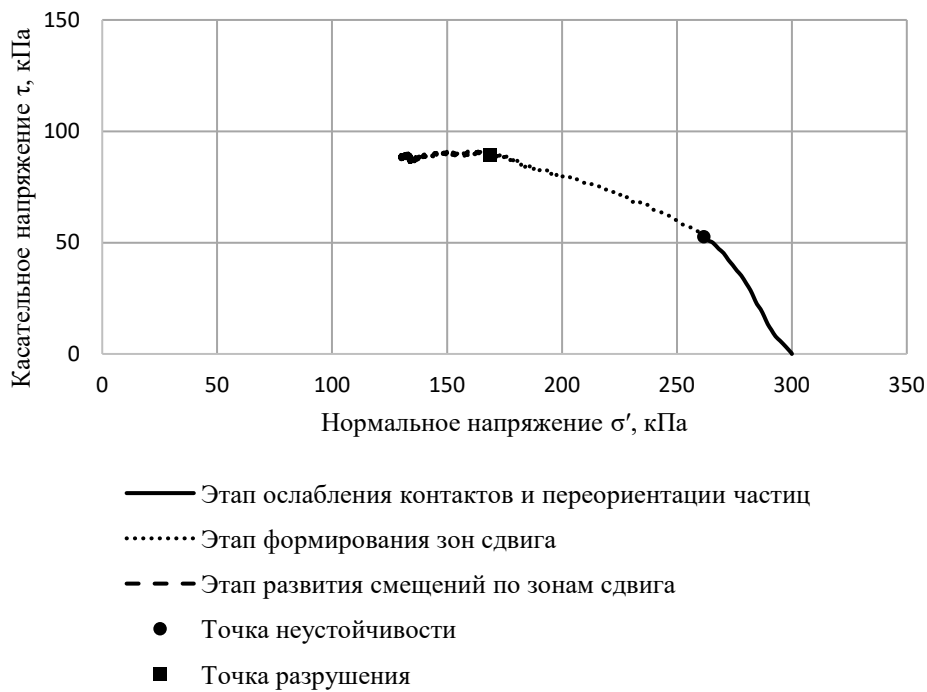


Рис. 7. Этапы сдвигообразования на траектории эффективных напряжений при испытании тяжелой глины при давлении консолидации $\sigma = 300$ кПа

и характеризуемой определенным соотношением напряжений, задающим ее наклон. Таким образом, определив параметры линии неустойчивости, можно рассчитать напряжение сдвига в точке деформационной неустойчивости для заданного значения эффективного напряжения.

Для оценки влияния условий испытания на положение точки неустойчивости было проведено 6 серий испытаний с разными скоростями деформирования: 0,01, 0,03, 0,1, 0,3, 1 и 3 мм/мин. В каждой серии было проведено по 7 опытов с различным начальным давлением консолидации от

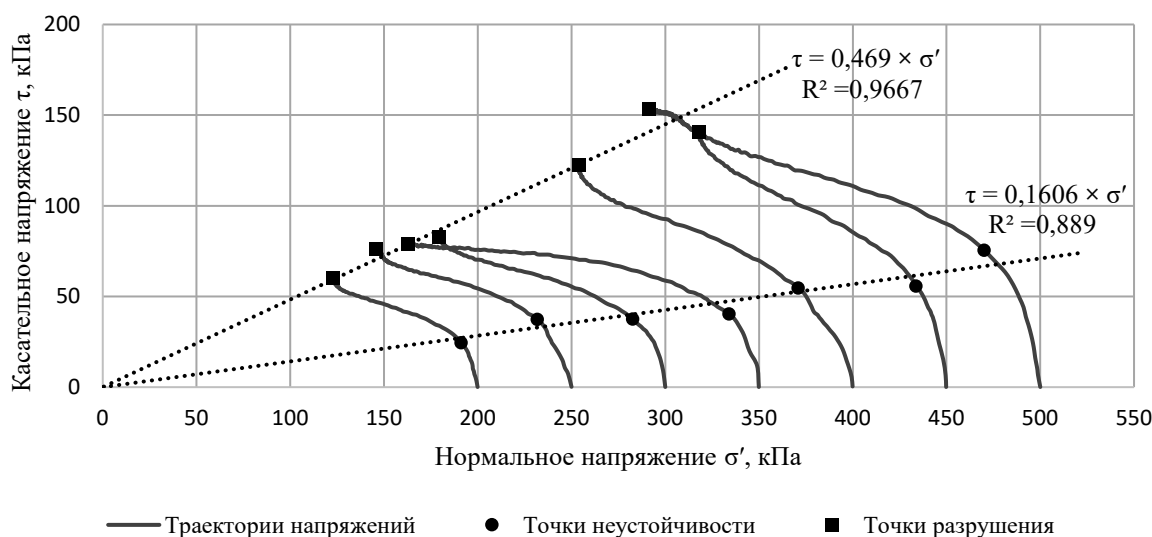


Рис. 8. Траектории напряжений в испытаниях модельной супеси при скорости деформирования 0,3 мм/мин

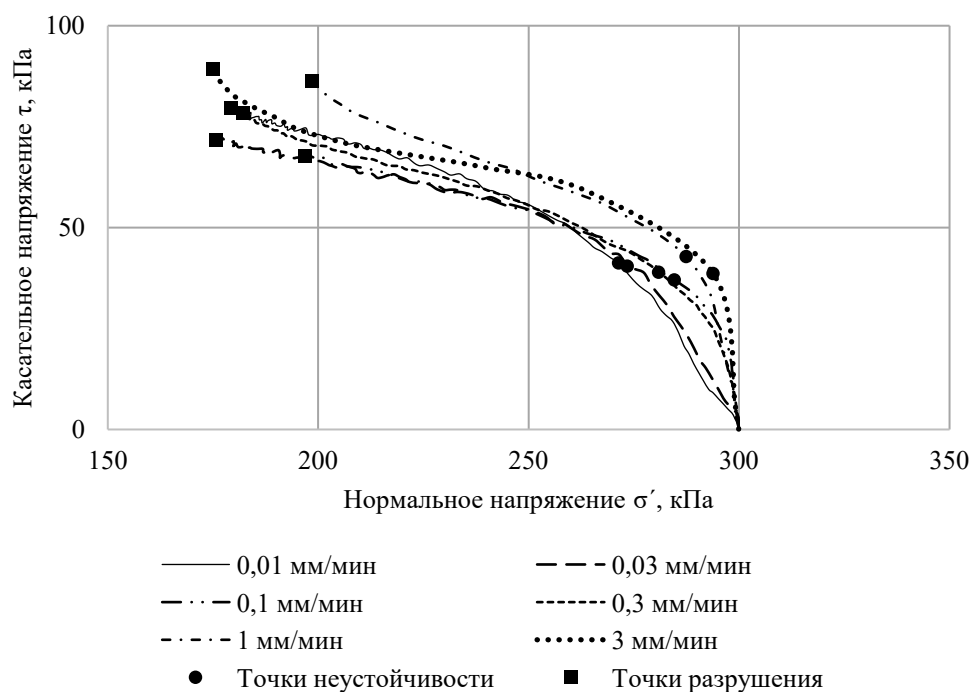


Рис. 9. Траектории напряжений в испытаниях модельной супеси при разной скорости деформирования при начальном напряжении $\sigma = 300$ кПа

200 до 500 кПа. Траектории напряжений для образцов модельной супеси при разной скорости деформирования при начальном напряжении $\sigma = 300$ кПа приведены на рисунке 9.

Можно заметить, что графики при скоростях 1 и 3 мм/мин показывают более высокие значения эффективных нормальных напряжений в момент разрушения. Количественные характеристики напряжений в точках деформационной неустойчивости и точках разрушения, полученные по результатам обработки шести серий испытаний, представлены в таблице 2.

Для каждой серии испытаний при различных скоростях были определены точки неустойчивости и критического состояния, а также рассчитаны описывающие их коэффициенты напряжений (табл.2). Их анализ показывает (рис. 10), что положение линии неустойчивости не зависит от скорости деформирования (в изученном ее диапазоне), в отличие от положения линии критического состояния, однако при скорости менее 0,1 мм/мин и это влияние оказалось несущественно для данной разновидности грунта.

Кроме соотношения напряжений для каждой точки была определена относительная сдвиговая

Таблица 2. Коэффициенты напряжений и пороговая сдвиговая деформация неустойчивости (средние значения) на линии критического состояния и на линии неустойчивости при разных скоростях деформирования

Скорость деформирования v , мм/мин	Коэффициент напряжений линии критического состояния τ/σ'	Коэффициент напряжений линии неустойчивости τ/σ'	Пороговая сдвиговая деформация неустойчивости γ
3	0,505	0,162	0,015
1	0,494	0,161	0,017
0,3	0,469	0,161	0,016
0,1	0,437	0,163	0,016
0,03	0,437	0,163	0,015
0,01	0,433	0,163	0,016



Рис. 10. Зависимость коэффициентов напряжений τ/σ' для линий неустойчивости и критического состояния от скорости деформирования

деформация неустойчивости γ , которая оказалась также постоянной для данного грунта при всех скоростях деформирования и не зависящей от начального давления консолидации.

Таким образом, можно констатировать, что пороговая деформация неустойчивости и коэффициент напряжений вполне однозначно характеризуют это состояние для данного типа грунта и не зависят ни от скорости деформирования, ни от нормального напряжения на стадии предварительной консолидации. Это иллюстрируется на рисунке 11 единой линией деформационной неустойчивости по результатам всех шести серий испытаний с незначительным разбросом коэффициента напряжений относительно среднего значения и коэффициентом парной корреляции более 0,99.

Этот факт вполне согласуется с высказанным выше предположением о реализации деформаций

на этой стадии за счет взаимных смещений частиц с их переориентацией и ослаблением контактных взаимодействий, но без их значимого разрушения.

Выводы

- Показана возможность идентификации состояния деформационной неустойчивости связных и несвязных грунтов в экспериментах с кинематическим нагружением в условиях простого сдвига с постоянным объемом водонасыщенного образца. Точка неустойчивости в таком испытании достаточно отчетливо выделяется первым перегибом на траектории эффективных напряжений и может быть получена оптимальной линейризацией смежных отрезков диаграммы.
- Сдвигообразование в грунтах развивается стадийно. На первой стадии — до достижения точки неустойчивости — деформация грунта возникает,

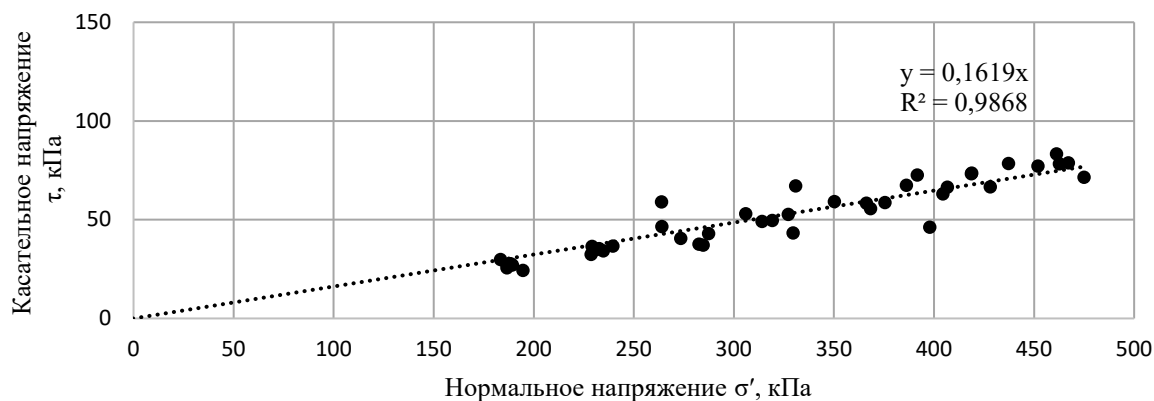


Рис. 11. Точки неустойчивости по результатам шести серий испытаний при разных скоростях деформирования

вероятнее всего, за счет взаимных смещений его структурных элементов с их сопутствующей переориентацией и ослаблением контактных взаимодействий, но без их массового разрушения. К концу этой стадии завершается формирование ослабленных зон, по которым на втором этапе сформируются зоны сдвига с постепенным накоплением числа разорванных контактов вплоть до разрушения. На третьей стадии разрушения все деформации грунта происходят исключительно внутри сформированных зон сдвига, количество и ширина которых определяются с его структурно-текстурными особенностями.

3. Деформация в точке неустойчивости и коэффициент напряжений вполне однозначно характеризуют это состояние для каждого отдельного грунта и не зависят ни от скорости деформирования, ни от нормального напряжения предварительной консолидации, что вполне согласуется с предложенным объяснением стадийности сдвигообразования и роли в нем деформационной неустойчивости. Таким образом, эта пороговая деформация грунта характеризует величину предельных взаимных смещений частиц, возможных без разрушения контактов между ними.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усов А. Н., Сенцова Е. А., Вознесенский Е. А. Закономерности проявления неустойчивости в глинистых грунтах в условиях монотонного трехосного сжатия //Инженерные изыскания. — 2014. — №. 5–6. — С. 19–23.
2. Усов А. Н., Вознесенский Е. А. Деформационная неустойчивость в глинистых грунтах. Возникновение и идентификация //Инженерная геология. — 2016. — №. 2. — С. 42–49.
3. Усов А. Н. и др. Изменение микростроения глинистых грунтов при деформировании в условиях трехосного сжатия с учетом проявления деформационной неустойчивости //Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. — 2017. — №. 6. — С. 87–91.
4. Chu J. et al. Instability of loose sand under drained conditions //Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. — 2012. — Т. 138. — №. 2. — P. 207–216.
5. Lade P. V., Nelson R. B., Ito Y. M. Nonassociated flow and stability of granular materials //Journal of Engineering Mechanics. — 1987. — Т. 113. — №. 9. — P. 1302–1318.
6. Lade P. V., Nelson R. B., Ito Y. M. Instability of granular materials with nonassociated flow //Journal of engineering mechanics. — 1988. — Т. 114. — №. 12. — P. 2173–2191.
7. Lade P. V. Static instability and liquefaction of loose fine sandy slopes //Journal of Geotechnical Engineering. — 1992. — Т. 118. — №. 1. — P. 51–71.
8. Lipinski M. J., Wolski W. Onset conditions of liquefaction //International Conference on soil mechanics and geotechnical engineering. — 2001. — P. 187–190.
9. Lipiński M. J., Wolski W. Parameters describing flow liquefaction of soils //Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. — IOS Press, 2005. — P. 547–550.
10. Marinelli F. et al. Model-based interpretation of undrained creep instability in loose sands //Géotechnique. — 2018. — Т. 68. — №. 6. — P. 504–517.
11. Mele L. et al. Instability Conditions of a Silty Sand under Monotonic Loads in Simple Shear Tests //Journal of Geotechnical and Geoenvironmental

- Engineering. — 2024. — T. 150. — №. 11. — P. 04024116 (1-15).
12. Sawicki A., Świdziński W. Modelling the pre-failure instabilities of sand //Computers and Geotechnics. — 2010. — T. 37. — №. 6. — P. 781–788.
13. Seed H. B., Mitchell J. K., Chan C. K. The strength of compacted cohesive soils // ASCE Conference Proceedings — 1961. — P. 877–964.
14. Soysa A., Wijewickreme D. Simple shear loading response of undisturbed and reconstituted silt // proceedings of the 68th Canadian Geotechnical Conference, Québec City, Québec, Canada. — 2015.
15. Świdziński W., Mierczyński J. Instability line as a basic characteristic of non-cohesive soils // Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. — 2005. — T. 52. — №. 1. — P. 39–58.
16. Wanatowski D. Undrained instability of loose sand under plane-strain conditions and its engineering application //Foundations of civil and environmental engineering. — 2007. — T. 10. — P. 131–141.
17. Zhao H. F., Zhang L. M. Instability of saturated and unsaturated coarse granular soils //Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. — 2014. — T. 140. — №. 1. — P. 25–35.