

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131.439

ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ И МЕТОДИКА ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

© 2023 г. Е. А. Сенцова^{1,*}, М. С. Никитин^{1,**}, Е. А. Вознесенский^{1,2,***}

¹Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, 119234 Москва, Россия

²Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, 101000 Москва, Россия

*E-mail: sentsovaea@gmail.com

**E-mail: mikes.nikitin@gmail.com

***E-mail: eugene@geoenv.ru

Поступила в редакцию 05.05.2023 г.

После доработки 07.06.2023 г.

Принята к публикации 09.06.2023 г.

Корректное определение прочностных свойств актуально для прогноза механического поведения грунтов и их массивов. Этот вопрос широко освещен в научной литературе в статической постановке задачи, однако определение прочностных свойств при динамическом нагружении остается дискуссионным. На основе совместного анализа данных статических и динамических трехосных испытаний в статье приводится разработанный авторами новый методический подход к определению параметров динамической сдвиговой прочности водонасыщенных образцов глинистых грунтов. Показано, что при прочих равных условиях величина угла внутреннего трения образцов глинистого грунта с преимущественно коагуляционной структурой в статических и динамических условиях одинакова, однако при динамическом нагружении сцепление снижается.

Ключевые слова: лабораторные испытания, динамические трехосные испытания, прочность грунтов, тиксотропия

DOI: 10.31857/S0869780923040082, **EDN:** YIGRGW

ВВЕДЕНИЕ

Влияние динамического режима нагружения на изменение прочности и параметров прочности дисперсных грунтов волнует как отдельных ученых, так и целые научные коллективы, начиная со второй половины XX в.

Изменение прочностных характеристик глинистых грунтов под действием вибрационных и динамических нагрузок в России начали исследовать, главным образом, с позиций изучения тиксотропных свойств грунтов несколько позже, чем песчаных.

Результаты исследований, посвященных обозначенной тематике, представлены в работах М.В. Аверочкиной [1, 2], Ю.А. Велли [3], Е.А. Вознесенского [4], Е.Н. Ермолаева [8], Г.Н. Жинкина [9, 10], Л.П. Зарубиной [11], К. Ишихары [25–27], К. Касуды [25], А.И. Кистанова [12], В.Н. Кутергина [13, 14], А.И. Лагойского [15], Р. Мано [26], А.А. Мусаэяна [16], А. Нагао [26], Н.А. Преображенской [17, 18], И.В. Прокудина [19], П.А. Ребиндера [20], И.А. Савченко [21],

В.А. Соколова [22], Ю.Г. Трофименкова [23], В.М. Тубольцева [24], А.Н. Шаниной [24].

Несмотря на то что в большинстве работ зафиксировано и описано явление снижения прочностных характеристик глинистых грунтов, воспринимающих вибрационные, динамические и вибродинамические нагрузки, в научном сообществе существуют различные точки зрения на природу этого эффекта, в том числе на количественную оценку динамических параметров прочностных свойств грунтов.

Цель данной работы — изучение закономерностей изменения сдвиговой прочности и параметров прочности глинистых грунтов в условиях динамического нагружения, а также разработка методики их экспериментального определения.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАННЫХ ГРУНТОВ

Для разработки методики определения сдвиговой прочности глинистых грунтов были проведены лабораторные эксперименты на модельных

Таблица 1. Характеристика исследуемых грунтов

Естественная влажность, (%)	Плотность грунта, (г/см ³)	Плотность скелета грунта, (г/см ³)	Плотность частиц грунта, (г/см ³)	Коэффициент пористости	Степень влажности, (д.е.)	Верхний предел пластичности, (%)	Нижний предел пластичности, (%)	Число пластичности, (%)	Показатель текучести
W	ρ	ρ_d	ρ_s	e	S_r	W_L	W_P	I_P	I_L
Модельные глинистые грунты (из глин J ₃₀ х, морского генезиса, район г. Обнинск Калужской области)									
59–61	1.59–1.63	0.99–1.02	2.67	1.61–1.70	0.95–0.99	74	48	26	0.43–0.50
60	1.61	1.01		1.65	0.97				0.46
Голоценовые глинистые грунты морского генезиса (северо-восточная часть Баренцева моря)									
80–87	1.47–1.55	0.78–0.86	2.64	2.06–2.31	0.94–1.00	91	38	53	0.77–0.92
83	1.51	0.83		2.19	0.97				0.84

образцах, изготовленных из верхнеюрских глин оксфордского яруса при заданной плотности и влажности. Модельный глинистый грунт с заданными свойствами использовался, чтобы исключить влияние разброса указанных показателей на величину определяемой прочности. По классификации ГОСТ 25100-2020 [6] грунт отнесен к глине легкой пылевой тугопластичной. Плотность модельных образцов варьировала в диапазоне от 1.59 до 1.63 г/см³, влажность – в диапазоне от 58 до 61%.

Также была проведена серия испытаний на голоценовом глинистом грунте естественного сложения морского генезиса (северо-восточная часть Баренцева моря). По классификации ГОСТ 25100-2020 [6] грунт отнесен к глине тяжелой текучепластичной. Естественная влажность образцов грунта составляет 79–87%, плотность 1.47–1.55 г/см³.

Характеристики исследуемых грунтов представлены в табл. 1.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная часть исследования включала в себя ряд необходимых определений показателей состава и свойств изучаемых глинистых грунтов и проведение лабораторных статических и динамических испытаний в условиях трехосного сжатия. Исследования выполнены на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Лабораторные эксперименты выполнены на приборах: статического/динамического трехосного сжатия “MINIDYN 2 Hz 10 kN” (GDS, Великобритания), статического и динамического трехосного сжатия (ООО “НПП ГЕОТЕК”, Россия).

Трехосные испытания проводились в несколько этапов: подготовка образца, контроль степени водонасыщения, консолидация, статическое или динамическое нагружение и обработка полученных результатов.

Подготовка образцов грунта для статических и динамических трехосных испытаний

В рамках данного исследования были использованы грунты естественного сложения и модельные образцы с заданной влажностью и плотностью.

Модельные образцы были изготовлены согласно ГОСТ 30416-2020 [7]. Исходный грунт высушивался в сушильном шкафу, растирался пестиком с резиновым наконечником, просеивался через сито с отверстиями диаметром 5 мм и затем замачивался на два часа. Для создания заданной влажности в грунт добавлялось расчетное количество воды Q_p [см³], определяемое по формуле (1):

$$Q_p = \frac{m_T(W_3 - W)}{\rho_w(1 + W)}, \quad (1)$$

где m_T [г] – масса исследуемого грунта при влажности W_3 и W [%] – соответственно заданная и исходная влажности грунта, д.е.; ρ_w – плотность воды, принятая равной 1 г/см³.

Подготовленный грунт послойно закладывался в обойму диаметром 8 см и высотой 16 см консолидометра конструкции ООО “НПП Геотек”. Камера прибора наполнялась водой до верхнего края обоймы, в оставшейся части камеры создавалось разрежение. С помощью вертикального поршня к грунту прикладывалась нагрузка в 100 кПа, уплотнение модельного грунта проводилось в течение двух суток.

Далее из модельного грунта или грунта естественного сложения с помощью специальных ножей и струн на поворотном столике-шаблоне вырезались образцы. Для выравнивания торцов использовались разъемные формы, позволяющие ровно подрезать жестким ножом образец, который затем устанавливался в латексной мембране в камеру трехосного сжатия, закрепляясь на торцах накладными резиновыми кольцами.

Проведение испытаний

Статические и динамические трехосные испытания проводились по консолидированно-недренированной схеме.

После подготовки образца и заполнения камеры прибора рабочей жидкостью был проведен контроль степени водонасыщения по параметру Скемптона (B):

$$B = \frac{\Delta U_i}{\Delta \sigma'_m}, \quad (2)$$

где ΔU_i — приращение порового давления в образце грунта, $\Delta \sigma'_m$ — приращение полного среднего напряжения.

Для проверки коэффициента Скемптона на камере трехосного сжатия перекрывался дренаж системы, затем производилось ступенчатое поднятие полного всестороннего напряжения (σ_3) до величины напряжений, заданных условием эксперимента. В процессе обжатия на каждой ступени проводились измерение и фиксация порового давления (U). Критерием стабилизации порового давления на ступени считалось достижение разницы показаний между двумя его измерениями не более 3 кПа за 15 мин. Далее по формуле (2) производился расчет параметра Скемптона. При достижении напряжения, заданного условием эксперимента, дренаж перекрывался.

После этой стадии эксперимента следовала стадия *изотропной консолидации* образца при открытом дренаже при напряжениях, заданных условиями эксперимента. Критерием окончания консолидации было принято условие изменения объема отжатой жидкости не более чем на 5 мм³ за 5 мин. При его достижении дренаж перекрывался, и осуществлялся переход на стадию статического либо динамического нагружения.

Серия *статических трехосных испытаний* проводилась со скоростью деформации 0.02 мм/мин. Нагружение проводилось до достижения 20% осевой деформации (ϵ_1).

Серия *динамических трехосных испытаний* была выполнена при разных всесторонних напряжениях с разными амплитудами динамических осевых напряжений (σ_d). Авторы при этом исходили из предположения о том, что уменьшение прочности грун-

тов происходит за счет изменения напряженно-деформированного состояния. Так как соотношение всесторонних напряжений и амплитуды динамического воздействия влияет на мобилизуемую прочность грунта, их величины подбирались таким образом, чтобы формирующаяся выборка результатов позволяла бы как можно более полно охарактеризовать изменение прочности в широком диапазоне нагрузок. Частота нагружения во всех экспериментах составляла 0.1 Гц. Динамическая нагрузка прикладывалась до достижения более 15% осевой деформации.

По результатам каждого испытания вычислялся набор параметров, необходимый для анализа и интерпретации поведения грунта: высота, площадь и объем образца грунта после консолидации, относительная вертикальная деформация, скорректированная площадь и величина осевого напряжения образца грунта на этапе девиаторного нагружения. Обработка полученных результатов испытаний проводилась в рамках теории прочности Кулона—Мора и анализа траекторий эффективных напряжений p' — q .

Траектории эффективных напряжений были построены в координатах “второй инвариант девиатора напряжений при осесимметричном трехосном сжатии (далее по тексту “девиатор”) — q , среднее эффективное напряжение — p' ”, рассчитанных по формулам (3)—(4):

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3), \quad (3)$$

$$p' = \frac{(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)}{3}. \quad (4)$$

Параметры прочности определялись расчетом в соответствии с положениями ГОСТ 12248.3—2020 [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для разработки единого подхода к определению сдвиговой прочности глинистого грунта в лабораторных условиях испытания проводились на модельных образцах с заданной влажностью и плотностью. В серии статических трехосных испытаний напряженное состояние в момент разрушения определялось по результатам каждого опыта по диаграмме девиатор (q) — осевая деформация (ϵ_1) при максимальном значении девиатора напряжений (рис. 1). Для дальнейшей интерпретации напряженное состояние в момент разрушения идентифицировано на траекториях эффективных напряжений p' — q (рис. 2), отражающих развитие напряжений в образцах на стадии сдвига.

Однозначная идентификация напряженного состояния в момент разрушения при интерпретации результатов динамических трехосных испытаний была затруднена, поскольку во всех прове-

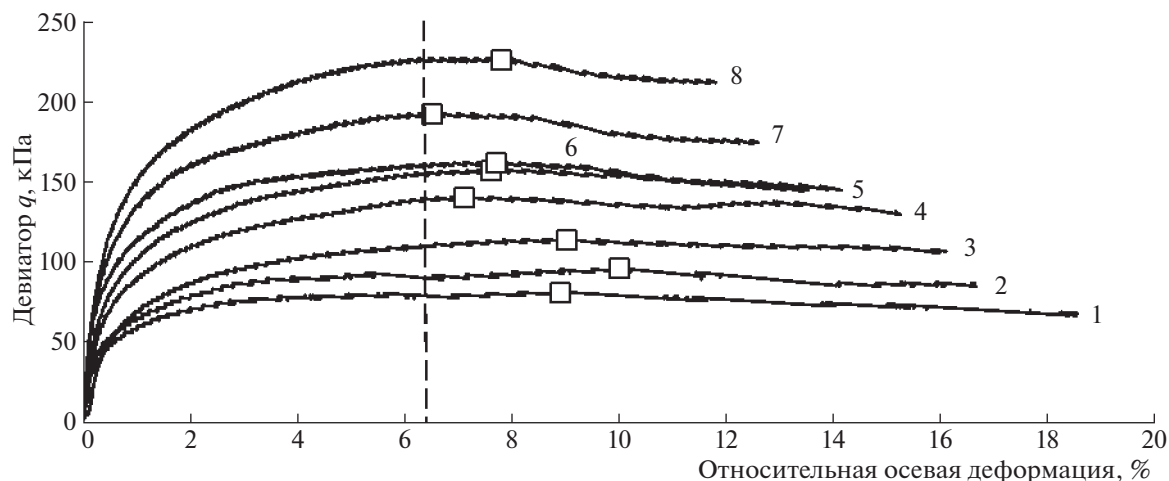


Рис. 1. Зависимость девиатора от относительной осевой деформации для серии статических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылеватой тугопластичной: 1 – $\sigma_3 = 50$ кПа, 2 – $\sigma_3 = 100$ кПа, 3 – $\sigma_3 = 150$ кПа, 4 – $\sigma_3 = 200$ кПа, 5 – $\sigma_3 = 250$ кПа, 6 – $\sigma_3 = 300$ кПа, 7 – $\sigma_3 = 350$ кПа, 8 – $\sigma_3 = 400$ кПа.

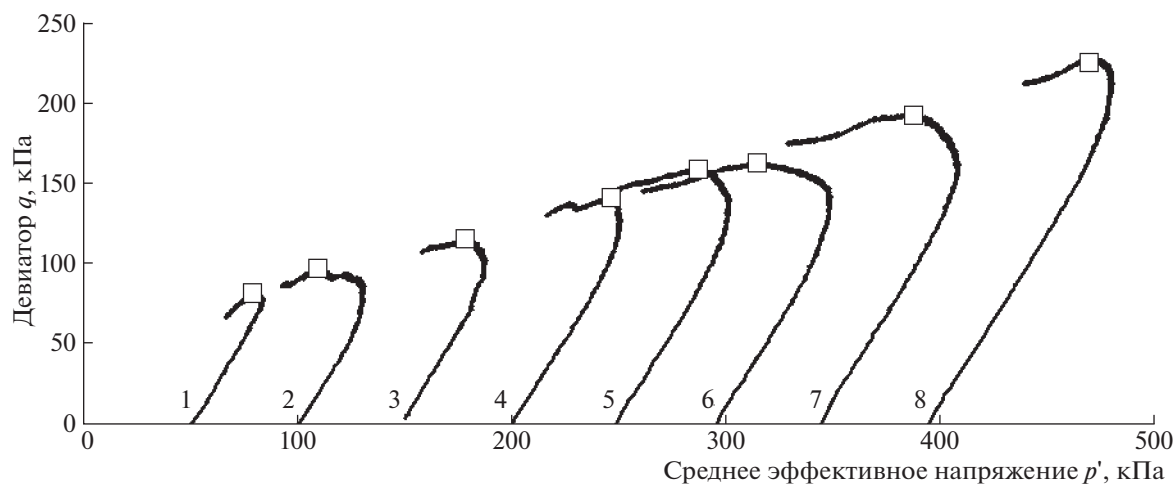


Рис. 2. Траектории эффективных напряжений для серии статических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылеватой тугопластичной: 1 – $\sigma_3 = 50$ кПа, 2 – $\sigma_3 = 100$ кПа, 3 – $\sigma_3 = 150$ кПа, 4 – $\sigma_3 = 200$ кПа, 5 – $\sigma_3 = 250$ кПа, 6 – $\sigma_3 = 300$ кПа, 7 – $\sigma_3 = 350$ кПа, 8 – $\sigma_3 = 400$ кПа.

денных испытаниях наблюдалась характерная постепенная деформация формы образца грунта. Типичный пример полученных результатов приведен на рис. 3.

С целью поиска критерия разрушения, который может быть использован при интерпретации результатов динамических испытаний глинистых грунтов, были проанализированы тренды накопления порового давления (рис. 4), осевой деформации (рис. 5) и удельной рассеянной энергии (рис. 6). Отчетливых изменений, указывающих на момент разрушения образцов, на полученных графиках не было выявлено. Поэтому предложено фиксировать напряженное состояние в момент разрушения глинистых грунтов на траектории эффек-

тивных напряжений как пиковое значение девиатора при соответствующем ему среднем эффективном напряжении, при котором уровень осевой деформации соответствует среднему предельному значению, полученному при разрушении этого же грунта в серии статических трехосных испытаний.

Перенос критерия разрушения по уровню накопленной осевой деформации при разрушении из статических трехосных испытаний на динамические вполне правомерен, поскольку уровень критического смещения структурных элементов образца исследуемого грунта не зависит от вида прикладываемой нагрузки. В целом аналогичный по смыслу подход регламентируется и в

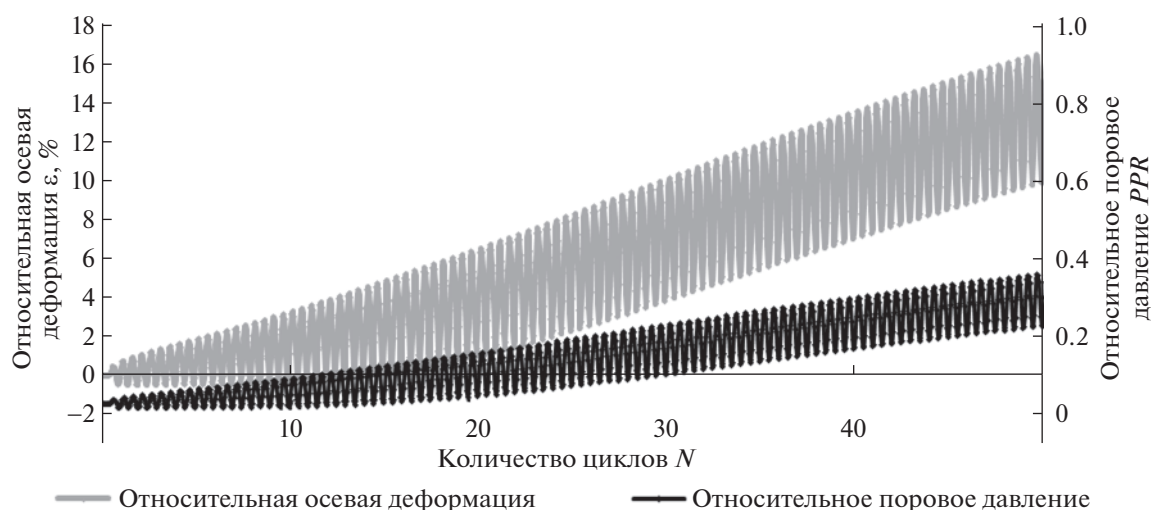


Рис. 3. Относительные осевая деформация и поровое давление при динамическом нагружении модельного образца глины легкой пылеватой тугопластичной при динамическом нагружении ($\sigma_3 = 50$ кПа, $\sigma_d = 38$ кПа).

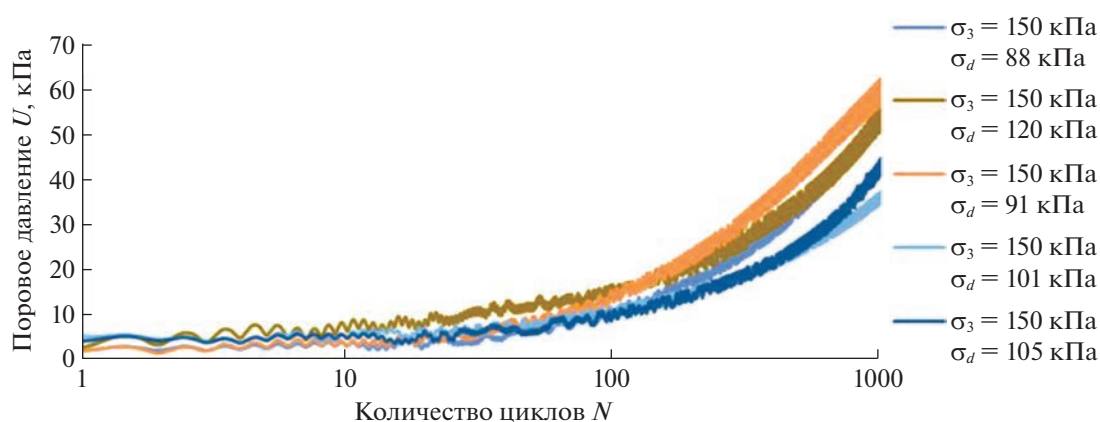


Рис. 4. Зависимость порового давления от количества циклов нагружения для серии динамических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылеватой тугопластичной.

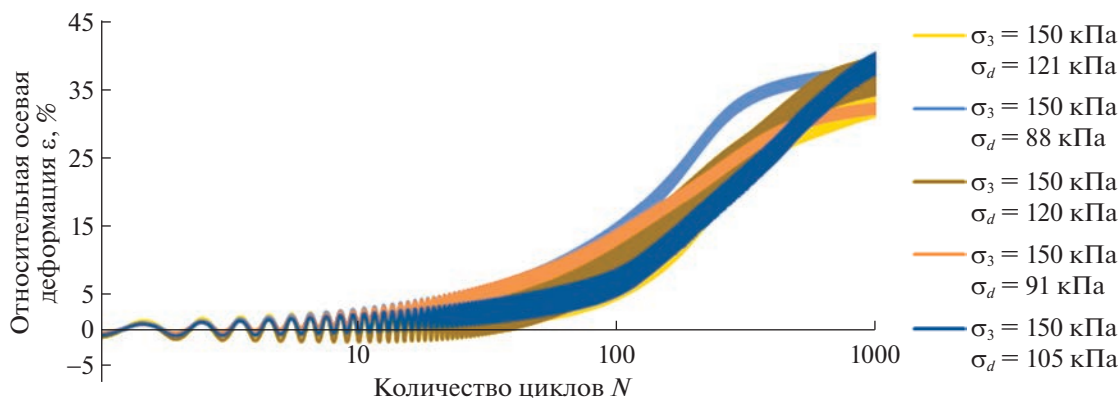


Рис. 5. Зависимость осевой деформации от количества циклов нагружения для серии динамических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылеватой тугопластичной.

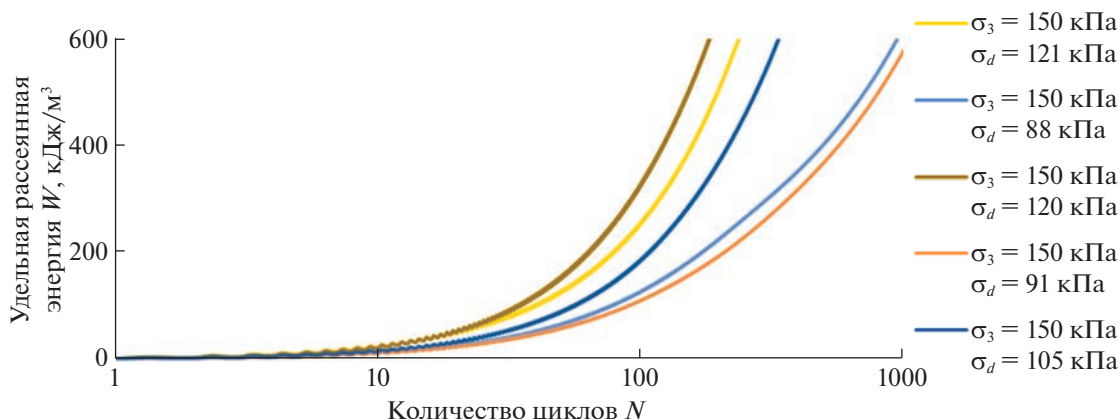


Рис. 6. Накопление удельной рассеянной энергии в функции числа циклов нагружения для серии динамических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылевой тугопластичной.

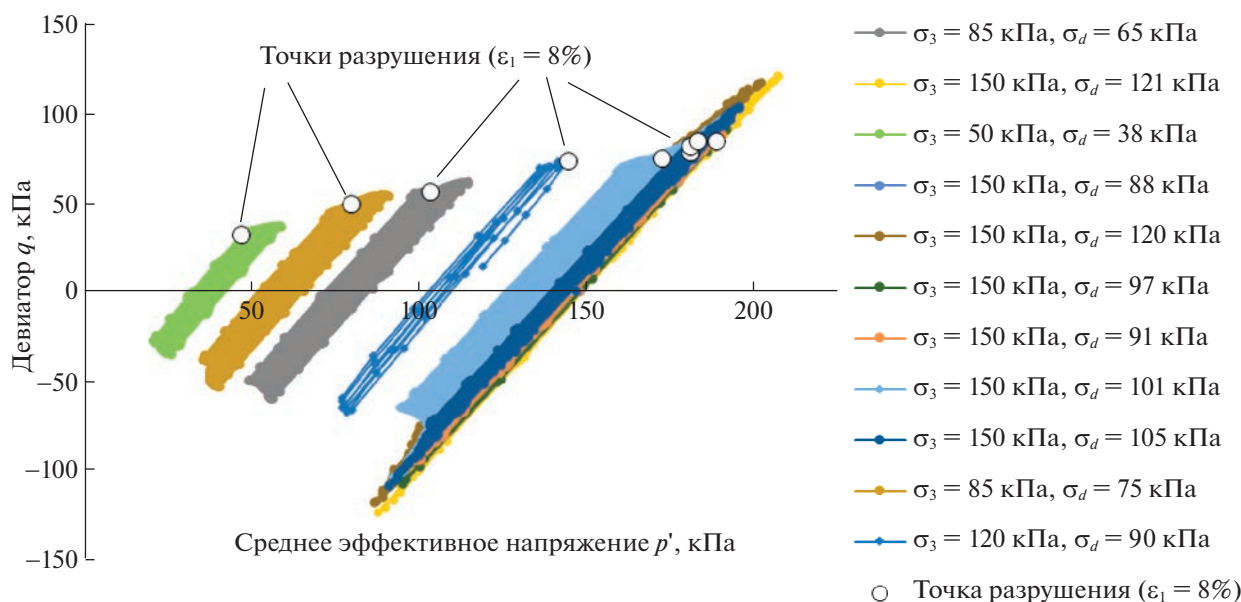


Рис. 7. Траектории динамических трехосных испытаний модельных образцов глины легкой пылевой тугопластичной.

ГОСТ 12248.3-2020 при испытаниях грунтов в условиях трехосного сжатия [5].

Полученные данные показывают, что среднее значение осевой деформации при разрушении исследованного глинистого грунта в серии статических испытаний составляет 8% (см. рис. 1). Поэтому «точки разрушения» на траекториях эффективных напряжений при динамическом нагружении были идентифицированы при предельной 8-процентной осевой деформации (рис. 7, 8).

Из приведенных на рис. 8 результатов следует, что модельный глинистый грунт в поле эффективных напряжений характеризуется линиями разрушения ($FL\ p'-q$) при статическом и динамическом нагружении:

$q = 0.36p' + 53.63$ и $q = 0.34p' + 18.53$ соответственно.

На рис. 9а для этого же грунта построены Круги Мора из условия разрушения при напряжениях, соответствующих уровню деформации 8%. При анализе результатов статических и динамических трехосных испытаний видно, что и в одном, и в другом режиме нагружения исследуемый грунт имеет неизменный угол внутреннего трения, равный 10° . Величина сцепления при статических трехосных испытаниях составляет 27 кПа, при динамических 10 кПа.

В рамках этого же методического подхода к определению мобилизуемой прочности глинистого грунта были обработаны данные статиче-

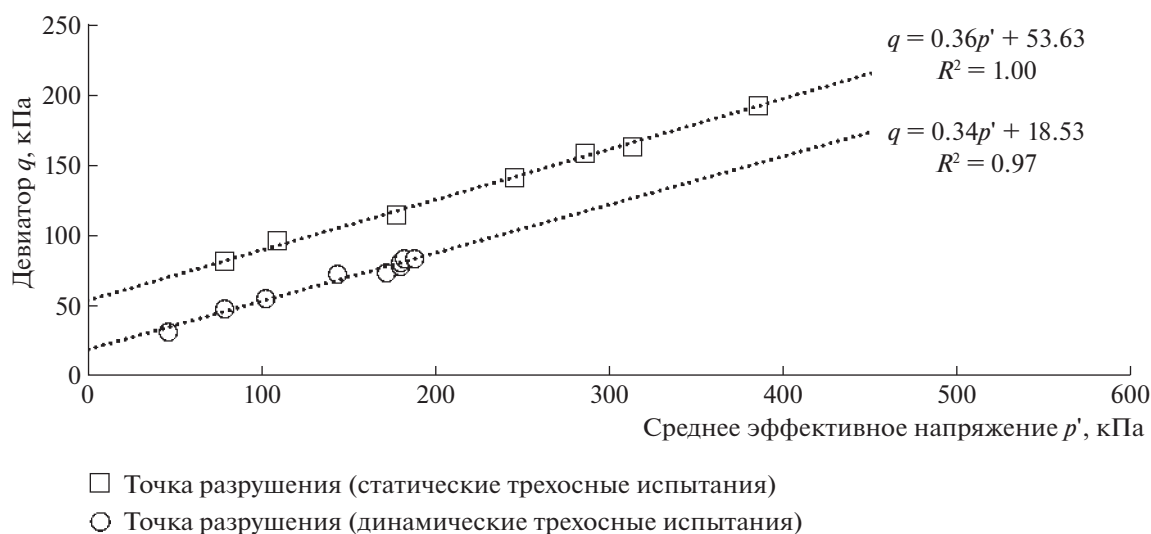


Рис. 8. Линии разрушения ($FL\ p'-q$) при статических и динамических трехосных испытаниях модельных образцов глины легкой пылеватой тугопластичной.

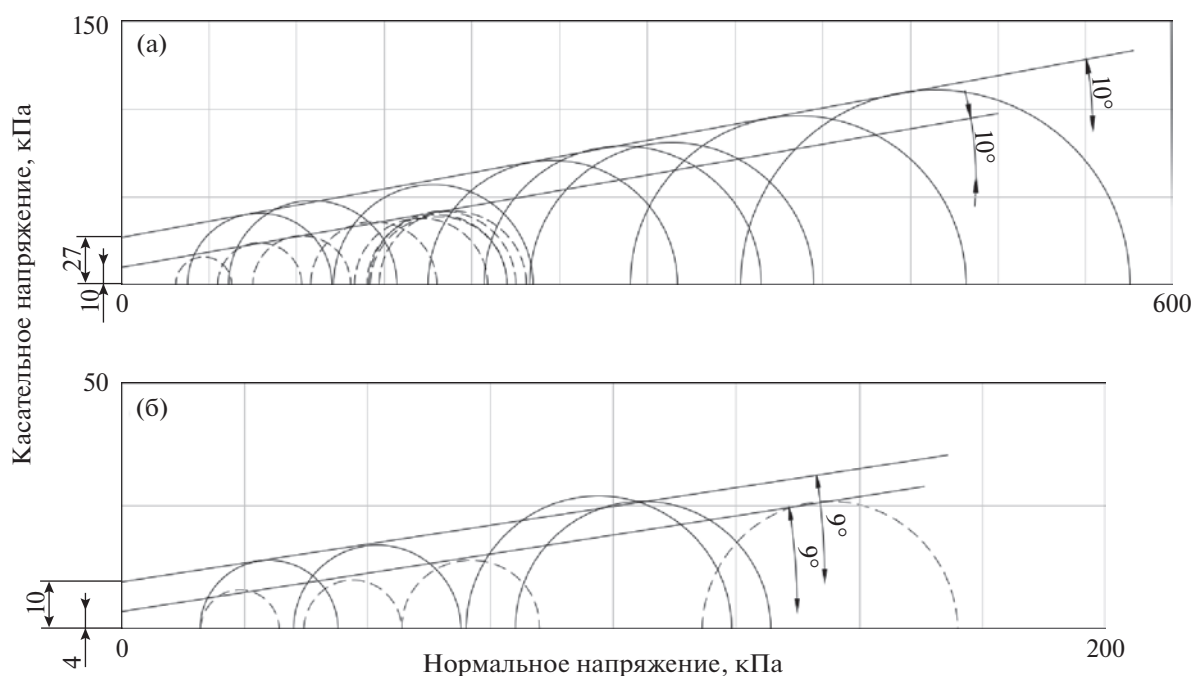


Рис. 9. Диаграмма Кулона–Мора по результатам статических (сплошная линия) и динамических (пунктирная линия) трехосных испытаний для образцов модельной глины легкой пылеватой тугопластичной (А) и глины тяжелой текуче-пластичной (Б).

ских и динамических испытаний образцов глины тяжелой мягкопластичной четвертичного возраста морского генезиса при природном сложении. Полученные данные показывают, что среднее значение осевой деформации при разрушении этого глинистого грунта в статических условиях составляет 4%. Следовательно, точки разрушения при динамическом нагружении идентифицированы нами при 4-процентной осевой деформации.

На рис. 9б по результатам статических и динамических трехосных испытаний построены Круги Мора. При их анализе видно, что и в одном, и в другом режиме нагружения исследуемый грунт имеет неизменный угол внутреннего трения, равный 9° . Величина сцепления при статических трехосных испытаниях составляет 10 кПа, при динамических 4 кПа.

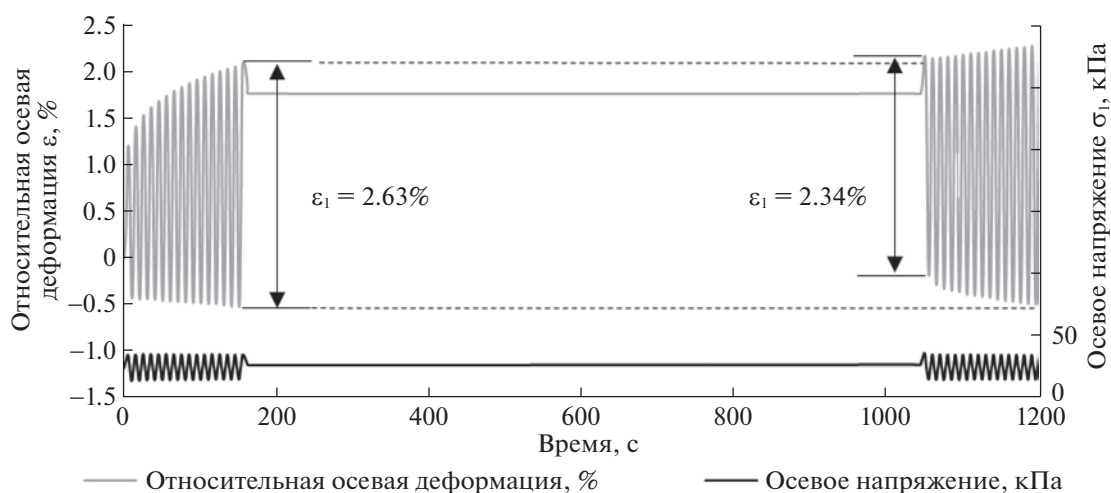


Рис. 10. Кинетика накопления относительной осевой деформации при динамическом нагружении образца глины легкой пылеватой тугопластичной ($\sigma_3 = 50$ кПа, $\sigma_d = 13$ кПа).

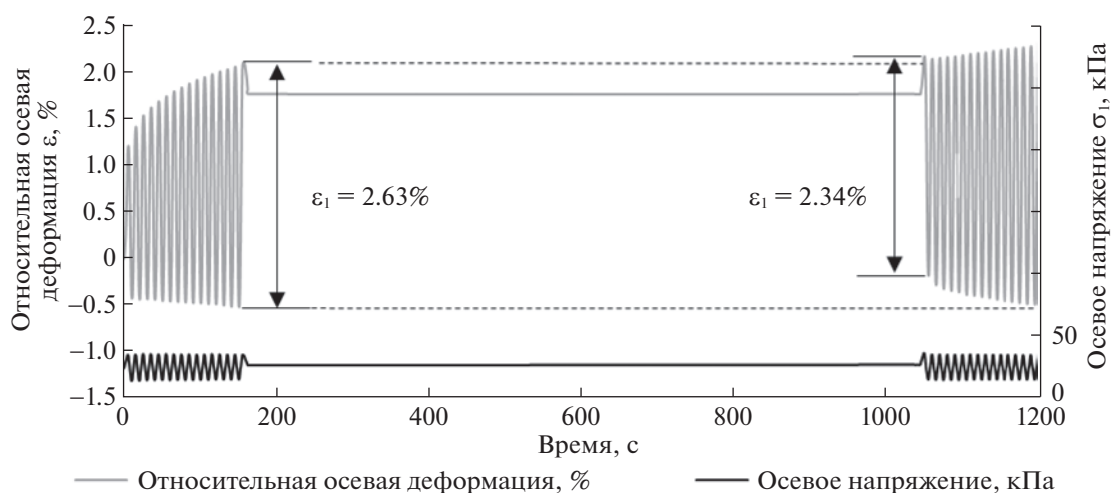


Рис. 11. Кинетика накопления относительной осевой деформации при динамическом нагружении образца глины тяжелой текучепластичной ($\sigma_3 = 50$ кПа, $\sigma_d = 13$ кПа).

Неизменность угла внутреннего трения и уменьшение сцепления при динамических испытаниях по сравнению со статическими при прочих равных условиях следует ожидать и для других глинистых грунтов с преобладанием коагуляционных межчастичных контактов. Это связано, прежде всего, с тем, что коэффициент трения любого материала не зависит от режима нагружения. Уменьшение же сцепления, по мнению авторов, происходит за счет проявления тиксотропных свойств исследованных водонасыщенных глинистых грунтов при действии динамической нагрузки.

Для доказательства проявления тиксотропных свойств исследованных глинистых грунтов проведены динамические трехосные испытания по следующей схеме. После подготовки образца,

проверки степени водонасыщения и изотропной консолидации в 50 кПа проведено 15 циклов динамического нагружения грунта с амплитудой осевой нагрузки 13 кПа и частотой 0.1 Гц. После 15-минутного перерыва с сохранением всестороннего обжимающего напряжения грунт повторно нагружался с аналогичными амплитудой, частотой и длительностью динамической нагрузки. Результаты двух динамических трехосных испытаний на образцах глины легкой пылеватой тугопластичной и глины тяжелой тугопластичной представлены на рис. 10 и 11.

Анализируя тренд развития осевой деформации во времени, в обоих случаях можно выделить следующие особенности:

— в течение первичного динамического нагружения глинистого образца происходит планомерный рост осевой деформации и ее амплитуды, который связан с тиксотропным разупрочнением за счет разрыва межчастичных контактов при взаимном смещении частиц под действием динамической нагрузки;

— после 15-минутного перерыва в нагружении амплитуда деформации спадает, что, наиболее вероятно, связано с частичным тиксотропным упрочнением грунта за время отдыха, а затем постепенно снова возрастает при дальнейшем нагружении.

Таким образом, было показано, что исследованные грунты действительно обладают тиксотропными свойствами и, следовательно, снижение сцепления при динамическом нагружении по сравнению со статическими условиями свидетельствует о частичном разупрочнении таких дисперсных систем.

ВЫВОДЫ

1. Напряженное состояние глинистых грунтов в момент разрушения следует фиксировать на траектории эффективных напряжений как максимальное значение девиатора при соответствующем ему среднем эффективном напряжении в том цикле нагружения, при котором уровень осевой деформации впервые достигает ее среднего предельного значения, характерного для разрушения этого же грунта в статических трехосных испытаниях. Напряженное состояние глинистого грунта при этом, по мнению авторов, соответствует его прочности, мобилизуемой в условиях динамического нагружения.

2. Параметры прочности, экспериментально полученные на модельном водонасыщенном глинистом грунте заданной плотности и влажности, показывают равенство углов внутреннего трения в сериях статических и динамических трехосных испытаний и уменьшение сцепления в 2.5–3.0 раза при динамическом нагружении в отличие от статического. Аналогичный результат получен и на глинистом грунте с коагуляционной структурой природного сложения.

3. Определение параметров динамической прочности водонасыщенных глинистых грунтов предполагает предварительную экспериментальную оценку величины предельной деформации при разрушении в статических условиях и экспериментальную оценку степени снижения сцепления грунта в динамических условиях. Угол же внутреннего трения может приниматься неизменным.

Работа выполнена на оборудовании, приобретенном в рамках реализации Программы развития Московского университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверочкина М.В.* Об особенностях распространения колебаний в железнодорожном земляном полотне // Волны в грунтах и вопросы виброметрии: матер. III Всесоюзной конф., Ташкент: Фан, 1975. С. 206–209.
2. *Аверочкина М.В.* О влиянии динамических нагрузок на прочность грунтов // Инженерная геология. 1983. № 1. С. 93–96.
3. *Велли Ю.А.* К вопросу о сейсмической устойчивости намывных ядерных плотин // Сб. тр. ЛИСИ. 1958. № 28. С. 87–126.
4. *Вознесенский Е.А.* Динамическая неустойчивость грунтов: дисс. ... д. геол.-мин. н. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2000. 368 с.
5. ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020. 31 с.
6. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2013. 44 с.
7. ГОСТ 30416-2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2020. 16 с.
8. *Ермолаев Е.Н., Сенин Н.В.* Сопротивление грунтов сдвигу при колебаниях // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1968. № 1. С. 8–10.
9. *Жинкин Г.Н.* Исследования тиксотропных глинистых грунтов // Сб. Ленингр. института инженеров железнодорожного транспорта. Ленинград: ЛИИЖТ. 1956. № 234. С. 71–86.
10. *Жинкин Г.Н., Прокудин И.В.* Результаты лабораторных исследований прочностных характеристик глинистых грунтов при динамических нагрузках // Сб. Ленингр. института инженеров железнодорожного транспорта. Ленинград: ЛИИЖТ, 1975. № 387. С. 5–52.
11. *Зарубина Л.П.* Исследование влияния динамических нагрузок на прочностные свойства земляного полотна: автореф. дисс. ... канд. техн. н. Ленинград: ЛИИЖТ, 1970. 22 с.
12. *Кистанов А.И.* Исследование вибродинамического воздействия поездов на глинистые грунты земляного полотна: дисс. ... канд. техн. н. Ленинград: ЛИИЖТ, 1969. 170 с.
13. *Кутергин В.Н.* Изменение прочности глинистого грунта при вибрации // Сб. статей института литосферы АС СССР: Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека. М.: Наука, 1982. С. 96–104.
14. *Кутергин В.Н.* Закономерности изменения свойств глинистых грунтов при вибрации. М.: Наука, 1989. 142 с.
15. *Лагойский А.И.* Исследование тиксотропных изменений глинистых грунтов в железнодорожном земляном полотне: автореф. дисс. ... канд. техн. н. Ленинград: ЛИИЖТ, 1962. 23 с.
16. *Мусаэлян А.А.* Динамические характеристики лесовых грунтов // Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений: мат. IV Всесоюзной конф., Ташкент: Фан, 1977. С. 174–178.

17. Преображенская Н.А. Экспериментальные данные о погружении и извлечении шпунта и свай вибрированием в песчаных грунтах // Сб. трудов НИИОСП: Динамика грунтов. 1958. № 32. М.: Госстройиздат, С. 66–82.
18. Преображенская Н.А., Савченко И.А. О влиянии вибраций на сопротивление глинистых грунтов сдвигу // Сб. трудов НИИОСП: Динамика грунтов. 1958. № 32. М.: Госстройиздат, С. 89–92.
19. Прокудин И.В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку: дис. ... докт. техн. н. Ленинград: ЛИИЖТ, 1982. 458 с.
20. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур и твердых тел. 2-е изд. М.: МГУ, 1968. С. 334–414.
21. Савченко И.А. Влияние вибраций на внутреннее трение в песках // Сб. трудов НИИОСП: Динамика грунтов. 1958. № 32. М.: Госстройиздат, С. 83–88.
22. Соколов В.А. К вопросу учета динамических нагрузок от подвижного состава при расчете устойчивости откосов земляного полотна // Труды НИИЖТ. 1956. № XII. С. 30–39.
23. Трофименков Ю.Г., Добровольский А.А. Влияние имитированных сейсмических воздействий на прочностные и деформационные свойства грунтов // Волны в грунтах и вопросы виброметрии: матер. III Всесоюзной конф. Ташкент: Фан, 1975. С. 118–126.
24. Тубольцев В.М., Шанина А.Н. Влияние вибраций, возникающих от действия подвижной нагрузки, на изменение прочностных характеристик связанных грунтов // Вопросы геотехники. 1969. № 15. С. 40–47.
25. Ishihara K., Kasuda K. Dynamic strength of cohesive soil // Proc. of the 6th Conf. on soil mechanics and foundation engineering. 1984. P. 91–98.
26. Ishihara K., Nagao A., Mano R. Residual strength of clay under seismic loading // Proc. of the 4th Canadian Conf. on Earthquake Engineering. 1983. P. 13.
27. Ishihara K., Tatsuoka F., Yasuda S. Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses // Soil and foundations. 1975. № 1. (15). P. 29–44.

DYNAMIC STRENGTH PARAMETERS OF CLAY SOILS AND METHODS FOR THEIR DETERMINATION

E. A. Sentsova^{a, #}, M. S. Nikitin^{a, ##}, and E. A. Voznesensky^{a, b, ###}

^a*Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University,
Leninskie Gory, 1, Moscow, 119234 Russia*

^b*Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS,
Ulansky per., 13, bld.2, Moscow, 101000 Russia*

[#]*E-mail: sentsovaea@gmail.com*

^{##}*E-mail: mikes.nikitin@gmail.com*

^{###}*E-mail: eugene@geoenv.ru*

Correct determination of strength properties is always relevant for the prediction of soil mechanical behavior. This issue in a static formulation of the problem is widely discussed in technical literature. However, the determination of strength properties under dynamic loading remains debatable. This paper discusses a new methodological approach developed to determine the parameters of dynamic shear strength of saturated samples of model clay soils based on a combined analysis of static and dynamic triaxial testing data. It is demonstrated that, other conditions being equal, the value of the angle of internal friction of clay soil samples with predominantly a coagulative structure is the same under static and dynamic conditions; however, cohesion decreases under dynamic loading and this effect is attributed to the thixotropic strength loss in such a soil.

Keywords: *laboratory tests, dynamic triaxial test, soil strength, thixotropy*

REFERENCES

1. Averochkina, M.V. [Features of the propagation of vibrations in the railway track]. Proc. 3th All-Union Conf. on waves in soils and issues of vibrometry. Tashkent, Fan Publ., 1975, pp. 206–209. (in Russian)
2. Averochkina, M.V. [Influence of dynamic loads on the soil strength]. *Inzhenernaya geologiya*, 1983, no. 1, pp. 93–96. (in Russian)
3. Velli, Yu.A. [Seismic stability of alluvial nuclear dams]. Collection of articles LISI, 1958, no. 28, pp. 87–126. (in Russian)
4. Voznesenskii, E.A. [Dynamic instability of soils]. Doctoral Sci. (Geol.-Min.) dissertation, Moscow, MSU Publ., 2000, 368 p. (in Russian)
5. [State Standard 12248.3-2020. Soils. Determination of strength and deformation parameters by triaxial compression testing]. Moscow, Standartinform Publ., 2020, 31 p. (in Russian)
6. [State Standard 25100-2011. Classification]. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 44 p. (in Russian)
7. [State Standard 30416-2020. Soils. Laboratory testing. General issues]. Moscow, Standartinform Publ., 2020, 16 p. (in Russian)

8. Ermolaev, E.N., Senin, N.V. [Shear resistance of soil during vibrations]. *Osnovaniya, fundamente i mekhanika gruntov*, 1968, no. 1, pp. 8–10. (in Russian)
9. Zhinkin, G.N. [Studies of thixotropic clay soils]. Collection of articles LIIZHT, 1956, no. 234, pp. 71–86. (in Russian)
10. Zhinkin, G.N., Prokudin, I.V. [Laboratory test results of the strength characteristics of clay soils under dynamic loads]. Collection of articles LIIZHT, 1975, no. 387, pp. 5–52. (in Russian)
11. Zarubina, L.P. [Influence of dynamic loads on the strength properties of the subgrade]. Extended abstract Cand. Sci. (Techn.) Dissertation, Leningrad, LIIZHT Publ., 1970, 22 p. (in Russian)
12. Kistanov, A.I. [Study of the influence of the vibrodynamic impact of trains on the clayey soils of the subgrade]. Extended abstract Cand. Sci. (Techn.) Dissertation, Leningrad, LIIZHT Publ., 1969, 170 p. (in Russian)
13. Kutergin, V.N. [Changing strength of clay soils under vibration]. In: [Geoenvironment transformation under the human impact]. Proc. Lithosphere Institute, USSR Academy of Sciences, 1982, pp. 96–104. (in Russian)
14. Kutergin, V.N. [Patterns of changes in soil properties during vibration]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 142 p. (in Russian)
15. Lagoiskii, A.I. [Study of thixotropic changes in clayey soils in the railway subgrade]. Extended abstract Cand. Sci. (Techn.) Dissertation, Leningrad, LIIZHT Publ., 1962, 23 p. (in Russian)
16. Musaelyan, A.A. [Dynamic characteristics of loess soils]. Proc. 4th All-Union Conf. “Dynamics of foundations and underground structures”, Tashkent, Fan Publ., 1977, pp. 174–178. (in Russian)
17. Preobrazhenskaya, N.A. [Experimental data of loading and extraction of sheet piles and piles by vibration in sandy soils]. Collection of articles NIIOSP: Soil and rock dynamics, 1958, no. 32, pp. 66–82. (in Russian)
18. Preobrazhenskaya, N.A., Savchenko, I.A. [Influence of vibration on shear resistance of clay soils]. Collection of articles NIIOSP: Soil and rock dynamics, 1958, no. 32, pp. 89–92. (in Russian)
19. Prokudin, I.V. [Strength and deformability of a railway subgrade made of clayey soils that perceive a vibrodynamic load]. Doctoral Sci. (Techn.) dissertation, Leningrad, LIIZHT Publ., 1982, 458 p. (in Russian)
20. Rebinder, P.A. [Physicochemical mechanics of dispersed structures and solids], 2nd edition, Moscow, MSU Publ., 1968, pp. 334–414. (in Russian)
21. Savchenko, I.A. [Influence of vibration on internal friction in sands]. Collection of articles NIIOSP: Soil and rock dynamics, 1958, no. 32, pp. 83–88. (in Russian)
22. Sokolov, V.A. [Consideration of dynamic loads from the rolling stock upon calculation of subgrade slope stability]. Collection of articles LIIZHT, 1956, no. 12, pp. 30–39. (in Russian)
23. Trofimenkov, Yu.G., Dobrovol'skii, A.A. [Influence of simulated seismic impacts on the strength and deformation properties of soils]. Proc. 3rd All-Union Conf. on Waves in soils and issues of vibrometry. Tashkent, Fan Publ., 1975, pp. 118–126. (in Russian)
24. Tubol'tsev, V.M., Shanina, A.N. [The effect of vibration from the impact of moving load on the change in the strength characteristics of cohesive soils]. *Voprosy geotekhniki*, 1969, no. 15, pp. 40–47. (in Russian)
25. Ishihara, K., Kasuda, K. Dynamic strength of cohesive soil. Proc. of the 6th Conf. on soil mechanics and foundation engineering, 1984, pp. 91–98.
26. Ishihara, K., Nagao, A., Mano, R. Residual strength of clay under seismic loading. Proc. of the 4th Canadian Conf. on Earthquake Engineering, 1983. p. 13.
27. Ishihara, K., Tatsuoka, F., Yasuda, S. Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses. *Soil and foundations*, 1975, no. 1, (15), pp. 29–44.