

УДК 539.3:624.131.439.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

© 2019 г. П. В. Логинов^а, З. Р. Салихова^а, К. С. Султанов^{а,*}

^а Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева АН РУз,
Ташкент, Узбекистан

*e-mail sultanov.karim@mail.ru

Поступила в редакцию 29.07.2018 г.

После доработки 29.07.2018 г.

Принята к публикации 10.09.2018 г.

Приведены результаты лабораторных экспериментов по динамическому сжатию образцов лессовых грунтов на установке динамических нагружений. Из результатов экспериментов определены предварительные значения механических характеристик грунтов. Получено численное решение волновой задачи, постановка которой идентична постановке эксперимента. На основе анализа результатов численных решений волновой задачи получены условия квазистатичности деформирования грунта при динамических нагружениях в эксперименте. Сопоставлением результатов эксперимента и численных расчетов, последовательным приближением, определены уточненные значения механических характеристик лессового грунта на основе упруго-вязкопластической модели деформирования грунта.

Ключевые слова: грунт, механические характеристики, вязкость, пластичность, волны, квазистатичность, эксперимент, напряжения, деформация, модель грунта, численные методы

DOI: 10.1134/S0572329919040068

1. Состояние вопроса и цель работы. Определению механических характеристик грунтов и горных пород посвящено огромное количество работ [1–18]. Большинство из них [1–9] посвящены определению механических характеристик различных грунтов, песка, горных пород при статических одноосных [1–3], двухосных [4] и трехосных [5–9] испытаниях. Динамическим испытаниям грунтов и горных пород посвящены работы [10–15]. В этих опытах динамические характеристики грунтов и горных пород также определены при одноосных [10, 11], сдвиговых [12, 13], циклических [14] и ультразвуковых импульсных нагружениях. Сложность определения механических свойств грунтов обусловлена широким разнообразием их видов, типов, структуры, состава и т.п. [1–10]. Механические свойства грунтов, также, очень чувствительны к видам нагрузки, т.е. значения механических характеристик значительно зависят от скорости нагружения [10, 14–18]. В [16–18] также рассмотрены методы определения механических характеристик грунтов из результатов лабораторных и натуральных экспериментов по динамическому сжатию грунтов. При этом, определение механических характеристик грунтов непосредственно связано с конкретным законом деформирования грунтов [16–18]. Экспериментальному определению механических характеристик грунтов, на основе конкретных законов их деформирования, при статических и динамических нагружениях посвящены работы [16–21]. В [19, 20]

механические характеристики грунтов определены на основе линейных законов деформирования грунтов, а в [20–22], на основе нелинейных уравнений состояния грунтов.

Физически нелинейные законы деформирования грунтов [20–26], предполагают знание достоверных экспериментальных диаграмм сжатия грунтов $\sigma_{ij}(\varepsilon_{ij})$, где σ_{ij} и ε_{ij} – соответствующие компоненты тензора напряжений и деформаций, а также необходимое количество параметров, входящих в рассматриваемые законы. Из результатов и выводов [16–18], следует, что наиболее достоверно экспериментальными методами зависимости $\sigma_{ij}(\varepsilon_{ij})$ и на основе их механические характеристики грунтов при статических и динамических нагружениях, целесообразно определять из результатов лабораторных экспериментов, которые имеют ряд преимуществ [1–9, 16–18]. В лабораторных экспериментах, также как и в натуральных возникают вопросы точности экспериментальных результатов и квазистатичности процесса деформирования грунта при динамическом сжатии образцов структурно ненарушенных и нарушенных грунтов. В [16, 17] первый вопрос решается применением методов статистической обработки к результатам экспериментов, что обусловлено проведением опытов в лабораторных условиях, где возможно обеспечение необходимого числа повторения одинаковых экспериментов по динамическому и статическому сжатию грунтов. Как отмечено в [16, 18–20], в натуральных условиях многократное повторение одинаковых экспериментов очень сложно, трудоемко и практически невозможно.

Второй вопрос в [16, 17] решается на основе теоретически полученных условий, обеспечивающих квазистатичность процесса деформирования грунтов при динамическом сжатии. Данное условие зависит от соотношений массы образца грунта и массы сжимающего поршня на установке динамических нагружений (УДН-100 и УДН-150), используемых в экспериментах [16, 17]. Обеспечение квазистатичности процесса динамического деформирования грунтов также можно осуществить регулируя соотношения времени нарастания до максимума и времени спада до нуля динамической нагрузки, что также обосновано теоретически в [16, 17].

Необходимо отметить, что в [16] также рассмотрены и решены вопросы теории измерения и точности напряжений в грунтах. Полученные в этом плане результаты в [16] являются фундаментальными и очень полезны при экспериментальных исследованиях процессов динамического деформирования грунтов, как в натуральных, так и в лабораторных условиях.

Следуя [16–18], в настоящей работе рассмотрен экспериментально-теоретический метод определения механических характеристик мягких грунтов на основе конкретной модели деформирования грунтов и результатов экспериментов на УДН-150 в лабораторных условиях. Рассматриваемый метод также позволяет определить, оценить квазистатичность динамического деформирования в процессе определения механических характеристик грунтов. В отличие от [16, 17] в предлагаемом методе квазистатичность процесса деформирования образца грунта оценивается на основе численных решений теоретической задачи, постановка которой идентична постановке эксперимента на УДН-150. Исходя из этого целью работы является разработка теоретико-экспериментального метода определения механических характеристик грунтов, основанного на теоретическом и экспериментальном определении диаграммы сжатия грунтов при статическом и динамическом нагружении.

2. Суть метода и его составляющие. В [16, 17] на основе лабораторных экспериментов на установках УДН-100 и УДН-150 были определены механические характеристики песчаных грунтов, суглинков, плотных глин с ненарушенной и нарушенной структурой. Для определения механических характеристик лессовых грунтов, которые широко распространены в сейсмоопасных регионах, была приобретена функционирующая УДН-150 из ИПМех РАН Институтом механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз.

Конструкция УДН-150 (далее УДН), принцип ее работы подробно описаны в [16, 17]. На УДН в грунтоприемную камеру размещается цилиндрический образец грунта ненарушенной или нарушенной структуры диаметром 150 мм и высотой 30 мм [16, 17]. Образец грунта, далее подвергается статической или динамической нагрузке через верхний поршень, а нижняя плоскость грунтоприемной камеры неподвижна. УДН работает по принципу компрессионного прибора, где образцы грунтов испытываются статическим сжатием.

Предлагаемый метод определения механических характеристик грунтов базируется на двух составляющих: на результатах опыта и численного решения теоретической задачи соответствующей постановки эксперимента. Первая составляющая получается проведением опытов в лабораторных условиях. Здесь важна, главным образом, достоверность полученных экспериментальных диаграмм сжатия. Достоверность опытных данных определяется статистической обработкой результатов опытов, как случайных величин [16, 17]. Здесь отметим, что экспериментальная основа (первая составляющая) предлагаемого метода должна гарантировать статистическую обработку опытных данных, то есть эти опытные данные должны быть результатами серийных, многократных экспериментов. Последнее обстоятельство обуславливает то, что первую составляющую метода целесообразно создавать в лабораторных условиях.

Вторая составляющая основывается на уравнении состояния грунта, где главным требованием является адекватность выбранной модели процессу деформирования грунта в опытах. Поэтому правильный выбор модели грунта играет важную роль во всех методах по определению механических характеристик грунтов.

Сущность предлагаемого метода заключается в том, что используя замкнутую систему уравнений движения с выбранной моделью деформирования грунта, подвергающегося испытанию на установке УДН, теоретическим путем из решения соответствующей к постановке эксперимента задачи определяется зависимость $\sigma_{11}(\epsilon_{11})$, то есть диаграмма сжатия грунта.

Далее сначала используя приближенные значения параметров уравнения состояния грунта (модели), определенные из результатов опытов традиционным путем [16–18], на основе решения волновой задачи строится теоретическая диаграмма $\sigma_{11}(\epsilon_{11})$ (далее вторые индексы опускаем). Сопоставляя теоретические и экспериментальные диаграммы $\sigma_1(\epsilon_1)$, корректируются значения параметров модели, то есть механические характеристики грунта. После нескольких приближений достигается достаточная и необходимая точность совпадения опытных и расчетных диаграмм $\sigma_1(\epsilon_1)$.

Таким образом, предложенный метод определения механических характеристик грунтов, основан на результатах опытов и на решении теоретической задачи, описывающей эксперимент. Точность данного метода обусловлена тем, что он, в принципе, включает в себя известные традиционные методы [16–18] определения механических характеристик грунтов, и на их основе определяются уточненные значения механических характеристик грунтов. Главным отличием рассматриваемого метода от существующих является то, что, в результате, механические характеристики грунтов определяются из решения системы уравнений движения грунта, адекватной процессу деформирования грунта в эксперименте. Обычно механические характеристики грунтов определялись непосредственно из опытных результатов путем несложных геометрических операций.

Определение механических характеристик грунтов на основе решения уравнений движения и деформирования грунтов, безусловно, повышает достоверность значений этих параметров, так как в этом случае рассматривается весь процесс деформирования грунта и теоретически и экспериментально.

3. Постановка эксперимента и теоретической задачи. Динамическая нагрузка, действующая на образец грунта, размещенного в УДН, создается сбрасыванием груза

определенной массы [16, 17]. Груз сбрасывается с некоторой высоты по направляющим стержням.

Установка УДН жестко закреплена на бетонном фундаменте, заглубленном в грунтовое основание на 1 м. Металлический груз падает на тензометрический стакан, который передает нагрузки через высокопрочный стальной шарик на верхний поршень установки. Стальной шарик обеспечивает централизацию удара груза [16, 17]. В необходимых случаях между стаканом и установкой могут быть использованы различные прокладки для изменения формы ударной нагрузки [16, 17].

Регулируя высоту сбрасывания груза, можно создавать динамическую нагрузку различной интенсивности и значения. Амплитуда нагрузки регулируется также весом груза. После удара, показания всех измерительных приборов и датчиков фиксировались на ЭВМ. При статическом нагружении грунта установка УДН устанавливалась под пресс. При этом показания датчиков также записывались на ЭВМ. Все измерительные датчики перед опытами тщательно оттарировывались на специальных тарировочных установках с помощью различных приспособлений [16, 17]. На установке УДН, была проведена серия опытов по динамическому и статическому сжатию образцов лессовых грунтов в диапазоне нагрузок $\sigma_{1\max} = 0.4\text{--}0.5$ МПа. Результаты этих экспериментов взяты в качестве первой, экспериментальной базы для определения механических характеристик лессовых грунтов при низких (сейсмических) нагрузках с различными скоростями деформирования образцов грунтов.

Методика проведения опытов и методы статистической обработки результатов экспериментов подробно приведены в [16, 17].

Сжатие грунта на УДН осуществляется по следующей схеме: на слой грунта, лежащего на жесткой неподвижной плоскости, действует динамическая нагрузка. Процесс деформирования грунта в установке одномерный, так как нагрузка равномерно действует по всей верхней плоскости слоя грунта.

Схематически это изображено в плоскости x, t на рис. 1. Здесь x – пространственная координата, направленная по оси цилиндрического образца грунта в УДН, t – время. Из [16, 17] следует, что датчик, расположенный в центре верхнего поршня регистрирует изменение напряжения, меняющегося от нуля до максимума и далее опять до нуля, т.е. непрерывно. Изменение этого напряжения, действующего в направлении оси x , показано схематически на рис. 1 в виде функции $\sigma = \sigma(t)$. Данная нагрузка действует на верхнюю плоскость слоя грунта, расположенного в грунтоприемной камере УДН, равномерно, из чего следует одномерность динамического, а также статического процесса сжатия грунта. Боковые стенки грунтоприемной камеры имеют достаточную гладкость, что позволяет принять силы трения между грунтом и боковой стенкой равным нулю. Исходя из этого силами трения грунта о боковой поверхности пренебрегаем [16, 17].

Слой грунта толщиной 3 см расположен на расстоянии $0 - x_*$ (рис. 1). На расстоянии $x = x_*$ находится верхняя плоскость нижнего, абсолютно жесткого, неподвижного поршня. Эту плоскость также можно считать неподвижной преградой. Грунт считается упруго-вязкопластическим. Волновая картина, соответствующая этому случаю, изображена на рис. 1.

При $t = 0$ на слой грунта начинает действовать нагрузка $\sigma = \sigma(t)$. По невозмущенному грунту распространяется волна. Фронт этой волны (рис. 1) является границей областей 0, 1 (0 – область покоя, 1 – область возмущения). Затем этот фронт отражается от нижнего неподвижного поршня и образует область 4. Под действием нагрузки $\sigma = \sigma(t)$ в грунте образуются пластические деформации. Следовательно, по грунту распространяется пластическая волна. Фронту пластической волны соответствует граница областей 1, 2. Эта же граница является границей упругого и пластического деформирования грунта.

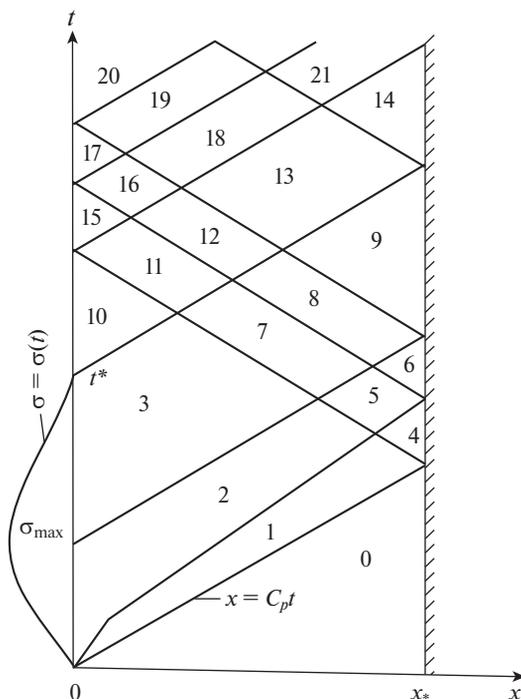


Рис. 1

После достижения нагрузкой $\sigma = \sigma(t)$ максимума, образуется еще один фронт (граница областей 2, 3) – фронт максимума напряжений в грунте. При $\sigma = \sigma(t) = 0$ по грунту распространяется фронт волны разряжения или разгрузки (граница областей 3, 10). Указанные выше фронты, отражаясь от нижнего поршня ($x = x_*$) и от верхнего поршня, который расположен при $x = 0$, образуют множество областей 5, 6, 7, 11–21 и так далее.

Благодаря тому, что действующая на слой грунта нагрузка $\sigma = \sigma(t)$ непрерывная, данные фронты являются линиями слабого разрыва. Это обстоятельство существенно облегчает решение теоретической задачи соответствующей динамическому сжатию слоя грунта на УДН.

На рис. 1 все фронты волн изображены прямыми линиями. Линейность фронтов волн, в основном, зависит от конкретного вида уравнения состояния грунта. В случае линейности или даже кусочно-линейности уравнения состояния грунта, по которой определяются механические характеристики грунтов, фронты волн остаются линейными (рис. 1). В противном же случае эти фронты – нелинейные. В случае нелинейности фронтов на рис. 1, задача динамического сжатия образца грунта существенно осложняется. Поэтому волновая картина на рис. 1 и, следовательно, постановка задачи, соответствующей рассматриваемому случаю, непосредственно зависят от уравнения состояния или закона деформирования грунта, на основе которых определяются механические характеристики грунтов.

4. Результаты опытов, полученных на установке динамических нагружений. Опыты на УДН проводились с лессовыми грунтами нарушенной структуры. После тщательной тарировки измерительных датчиков они устанавливались на УДН. Далее образцы

грунта размещались в грунтоприемной камере установки и тщательно, равномерно уплотнялись. Перед проведением опытов, каждый раз измерялись и определялись удельная масса ρ_0 , влажность W и грансостав грунта. В опытах эти характеристики грунтов были практически одинаковыми и имели следующие значения – $\rho_0 = 1500 \text{ кг/м}^3$, $W = 14\%$. Грансостав грунта мелкозернистый с диаметром зерен 0.05 мм. Образцы грунта подвергались динамическому нагружению сбрасыванием груза весом 1.05 кН с высоты 10 см. После удара, образец грунта, заменялся новым образцом, и опыт повторялся. Повторность одинаковых опытов была тридцатикратной.

В результате серии экспериментов при одинаковых нагружениях было получено 120 записей осевых напряжений $\sigma_1(t)$. Осевые напряжения записывались четырьмя датчиками напряжения. Общее количество записей осевых деформации $\epsilon_1(t)$, произведенных тремя датчиками деформации при одинаковых нагружениях (ударах) равняется 90. Записи боковых напряжений $\sigma_2(t)$ по показаниям двух датчиков при одинаковых нагружениях равны 60. Имеется также 30 записей изменения напряжения по времени, полученных по показаниям силового стакана. Определение фактических значений напряжений σ_1 , σ_2 и деформаций ϵ_1 производились с помощью ЭВМ.

Статические эксперименты также проводились в лабораторных условиях на УДН, для проведения которых установка подготавливается к работе также как и при динамических экспериментах. Здесь меняется только нагрузка, действующая на грунт. Нагрузка создавалась с помощью гидравлического пресса. Значение нагрузки контролировалось с помощью манометра в гидропрессе. Максимальная нагрузка, действующая на образец грунта, ограничивалась 0.5–0.6 МПа, исходя из результатов динамических опытов.

Полученные опытные зависимости $\sigma_1(t)$, $\sigma_2(t)$, $\epsilon_1(t)$, $\sigma_1(\epsilon_1)$ при динамических и статических нагружениях позволяют обработать их методами математической статистики. Отметим, что повторность опытных данных существенно повышает достоверность полученных результатов экспериментов. Этому же способствует статистическая обработка результатов опытов, еще больше повышающая их достоверность [16, 17]. Следуя и по методике [16, 17], проведена статистическая обработка результатов серийных экспериментов.

Статистическая обработка результатов опытных данных, полученных, на УДН, проведена с использованием разработанной программы для ЭВМ на основе методики [16, 17]. Для этого отобраны по 40 кривых зависимостей $\sigma_1(t)$, $\epsilon_1(t)$, $\sigma_2(t)$, наиболее близкие по параметрам. Повторяемость опытных данных для каждого момента времени для каждой из этих зависимостей, равна 40. Следовательно, количество выборок (случайных величин) для каждого момента времени также равно 40. Моментов времени, выбранных из записей этих зависимостей по показаниям датчиков, 50. Таким образом, имеем 50 выборок случайных чисел с 40 разовым повторением. Это достаточно хорошая выборка случайных чисел (опытных данных) для статической обработки [16, 17]. По результатам статистической обработки опытных данных определялись вероятность нормального распределения опытных данных, математическое ожидание, дисперсия и доверительные интервалы, как для математического ожидания, так и для дисперсии. Результаты расчетов показали, что вероятность допущения закона распределения опытных данных для всех выборок равнялась $\alpha_n = 0.6–0.8$. Это достаточно высокая вероятность, которая дает основание полагать, что закон распределения опытных данных является нормальным.

Значение математического ожидания для выборок (среднеарифметическое значение опытных данных) и для рассмотренных моментов времени динамических опытов (кривая 1) и статических опытов (кривая 2) приведены на рис. 2. На рис. 2 для упрощения не показаны доверительные интервалы для математического ожидания в виде вертикальных и горизонтальных линий или четырехугольников. Разброс опытных

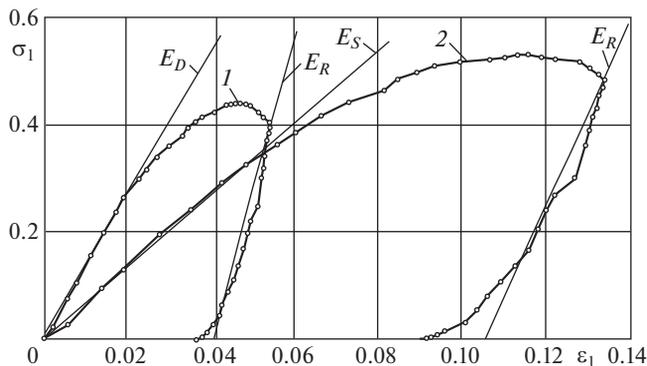


Рис. 2

данных составляет в общем 10–15%. Это вполне допустимо для опытов по динамическому нагружению образцов грунтов [16, 17].

Из рис. 2 видно, что значение осевых напряжений (в МПа) сначала нарастает до максимума, а после достижения своих максимальных значений спадает. Время нарастания до максимума в динамических опытах по зависимостям $\sigma_1(t)$ составляет 0.035–0.04 с. Время спада равно 0.07–0.08 с, отсюда следует, что интенсивность возрастания осевых напряжений больше, чем интенсивность их спада. В некоторых случаях в стадии возрастания напряжения разброс опытных данных небольшой, а в стадии спада в два раза больше. Максимальное значение напряжений σ_1 достигает в среднем 0.4 МПа, следовательно, скорость нагружения $d\sigma_1/dt = 10$ МПа/с. В проведенных опытах разброс максимальных значений напряжений составляет – от 0.40 до 0.48 МПа.

Скорость нагружения 10 МПа/с соответствует средним скоростям нагружения. Для увеличения скорости нагружения необходимо увеличить высоту сброса груза. В результате, это приводит к увеличению максимальных значений напряжения. В проведенных сериях экспериментов заранее планировалось исследование низких (сейсмических) уровней напряжений, поэтому приходится ограничиваться полученными значениями скоростей нагружений.

Осевые деформации ϵ_1 , также как осевые напряжения σ_1 , сначала нарастают до максимума, затем спадают. В отличие от напряжений σ_1 деформации не уменьшаются до нуля. Они падают до определенного значения ϵ_r и на этом значении остаются постоянно (рис. 2). Значение ϵ_r – остаточная деформация, характеризует пластические свойства лессового грунта, в опытах она равнялась 0.03–0.04, т.е. составляют 60% от максимального значения деформаций $\epsilon_{1\max}^a = 0.058$. Достаточно высокое значение остаточных деформаций, полученный в опытах, показывает, что образцы грунта, использованные в опытах, обладали высокими пластическими свойствами.

В отличие от напряжения σ_1 , деформации ϵ_1 (рис. 2) достигают своего максимального значения с некоторым опозданием. Если максимальные значения напряжений достигаются при $t = 0.03$ –0.04 с, то максимальные значения деформации достигались при $t = 0.05$ с. Скорость деформации в динамических опытах равнялась 1 с^{-1} . Данное значение скорости деформирования грунта ниже среднего, если учесть, что предельное значение скорости деформирования для лессовых грунтов, равняется $d\epsilon/dt = 15$ –30 с^{-1} [16–18].

Образование остаточных (пластических) деформаций и достижение максимальных значений напряжений и деформаций в разное время (рис. 2) являются самыми характерными свойствами лессовых грунтов [19].

Запаздывания максимума деформаций, то есть достижение максимума деформации после достижения максимума напряжения, в [18] объяснялось проявлением вязких свойств грунтов. Соответственно, был разработан закон деформирования грунта (модель), учитывающий эти свойства [18]. С учетом указанных свойств грунтов, были разработаны аналогичные уравнения состояния грунтов в [16, 17].

Диаграммы сжатия грунтов, приведенные на рис. 2, вполне соответствуют закону упруго-вязкопластического деформирования грунта, предложенного в [18]. Исходя из этого, механические свойства лессовых грунтов, определяем на основе упруговязкопластической модели [18].

Максимальные значения боковых напряжений в динамических опытах достигаются при $t = 0.04$ с и равны 0.15–0.17 МПа. Следовательно, значение коэффициента бокового давления для данного образца лессового грунта равняется $K_\sigma = \sigma_{2\max}/\sigma_{1\max} = 0.33$ –0.4. Значение коэффициента бокового давления указывает также на высокую пластичность лессового грунта, использованного в опытах на УДН.

Изменения осевых напряжений по времени при статических нагружениях (рис. 2, кривая 2) отличаются от аналогичных зависимостей при динамических нагружениях существенно большим временем нарастания до максимума, затем спада. Время нарастания до максимума при статических нагружениях составляет 12–13 с, а время спада – 18–17 с. Скорость нагружения, при этом, равняется 0.04–0.05 МПа/с. Эти значения соответствуют низким значениям скорости нагружения. Они, по сравнению с динамическими опытами, в 250 раз меньше.

Разброс статических результатов опытов, по сравнению с динамическими, небольшой 5–10%. При статических экспериментах удается лучше управлять процессом деформирования грунта, чем при динамических опытах, этим обстоятельством объясняется и меньший разброс в опытных данных.

Скорость деформирования $d\varepsilon/dt$ по результатам статических опытов, приведенных на рис. 2, составляет 0.01 с^{-1} . Это значение в 100 раз меньше, чем значение скорости деформирования в динамических опытах. Максимальные значения деформации $\varepsilon_{1\max} = 0.14$ в статических опытах достигаются при $t = 15$ с. Время достижения максимальных значений напряжения и деформации здесь также разное.

При этом время достижения максимума деформации больше, чем время достижения максимума напряжения, на 2–3 с. Максимальная деформация в статике в 2–3 раза больше, чем в динамике. Наблюдаются большие значения остаточных деформаций, характеризующие существенную пластичность грунта в опытах (рис. 2, кривая 2). В целом, основные характеристики динамических диаграмм сжатия грунта при статических нагружениях также сохраняются.

Используя диаграммы $\sigma_1(\varepsilon_1)$ определяем предварительные механические характеристики лессового грунта. Начальные участки этих диаграмм нагружения аппроксимируем прямыми линиями (рис. 2). Они составляют динамическую – E_D и статическую – E_S модули сжатия грунта. Согласно диаграмме $\sigma_1(\varepsilon_1)$ на рис. 2, значение динамического модуля сжатия больше, чем значение статического модуля сжатия грунта примерно в 2.5 раза. Аналогично можно определить модули разгрузки лессового грунта при динамических и статических нагружениях. Аппроксимируя ветки зависимостей $\sigma_1(\varepsilon_1)$ при разгрузке прямыми линиями, получаем, что отношение модуля разгрузки E_R к динамическому модулю – E_D , примерно равно 0.5 при динамических нагружениях грунта (кривая 1, рис. 2).

В целом, диаграммы сжатия лессового грунта, даже при низких значениях нагрузок, как в динамике, так и в статике, нелинейны. Как уже отмечалось, максимальные зна-

чения напряжения не совпадают с максимальными значениями деформации, как при динамике, так и при статике. Модули динамического и статического сжатия значительно отличаются друг от друга. Эти качественные характеристики закономерностей сжатия лессового грунта полностью совпадают с характеристиками упруго-вязкопластической среды, модель которой приведена в [18]. Это дает основание для определения механических характеристик лессовых грунтов на основе модели грунта как упруго-вязкопластической среды, предложенной в [18].

5. Определение механических характеристик лессового грунта на основе закона упруго-вязкопластической среды. Модель упруго-вязкопластической среды, предложенная в [18] имеет следующий вид

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} + \mu\varepsilon &= \frac{d\sigma}{E_D dt} + \mu \frac{\sigma}{E_S} \quad \text{при} \quad \frac{d\sigma}{dt} > 0, \quad \frac{d\varepsilon}{dt} > 0 \\ \frac{d\varepsilon}{dt} + \mu\varepsilon &= \frac{d\sigma}{E_R dt} + \mu\sigma \left(\frac{1}{E_S} - \frac{1}{E_D} + \frac{1}{E_R} \right) + \\ &+ \mu\sigma_m \left(\frac{1}{E_D} - \frac{1}{E_R} \right) \quad \text{при} \quad \frac{d\sigma}{dt} < 0, \quad \frac{d\varepsilon}{dt} > 0 \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{d\sigma}{E_R dt} \quad \text{при} \quad \frac{d\sigma}{dt} < 0, \quad \frac{d\varepsilon}{dt} < 0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

где E_D – модуль динамического сжатия грунта, E_S – модуль статического сжатия грунта, E_R – модуль разгрузки, μ – параметр вязкости, который связан с коэффициентом вязкости соотношением

$$\mu = \frac{E_D E_S}{\eta(E_D - E_S)} \quad (5.2)$$

где η – коэффициент вязкости грунта при изменении его объема, σ_m – максимальное напряжение в частице грунта.

В (5.1) напряжение σ и деформация ε соответствуют напряжениям σ_1 и деформациям ε_1 в опытах. Для упрощения записи в (5.1) индексы опущены. Деформация ε , применительно к опытам на УДН, однозначно определяет изменение объема слоя грунта. Поэтому она может рассматриваться как объемная деформация, а σ – как давление. В этом случае $\sigma = -P$, где P – давление. Отсюда следует, что уравнение состояния грунта (5.1) – это закон изменения шаровой части тензора напряжения, то есть закон объемного деформирования грунта. Объемная деформация ε и массовая скорость v при сжатии грунта считается положительной.

Из (5.1) видно, что в этом случае основными механическими характеристиками грунта являются E_D , E_S , E_R и μ или η (5.2). Отсюда, основной задачей является достоверное определение значений этих характеристик грунта на основе результатов экспериментов, приведенных выше.

До настоящего времени значения перечисленных выше или других (на основе других уравнений состояния грунтов) механических характеристик грунтов определялись непосредственно по результатам опытов используя диаграммы сжатия грунтов [16–20].

Однако, из рис. 1 видно, что динамическое сжатие грунта на установках динамических нагружений типа УДН или других типов – процесс достаточно сложный, который сопровождается довольно сложной волновой картиной. На значения напряжения, а также деформации в различных точках образца грунта по оси x , влияют как отраженные от нижнего и верхнего поршня волны, так и их наложения. В результате, мы можем получить не истинные значения механических характеристик грунта, а кажущиеся их значения, образованные в результате наложения падающих и отраженных волн.

Влияние волновых процессов на значения механических характеристик грунтов определяется квазистатичностью процесса деформирования грунта на УДН [16, 17]. Несмотря на оценку квазистатичности процесса деформирования грунта на УДН [16, 17], это условие нуждается в оценке через исследования волнового процесса в образце грунта, находящегося под динамической нагрузкой на УДН. Кроме этого, именно сложность волнового процесса в грунте при его динамическом сжатии в лабораторных установках типа УДН требует определения механических характеристик грунта по результатам решения задачи, соответствующей постановке опыта, а не по диаграммам сжатия непосредственно.

Для определения механических характеристик грунтов из решения задач о динамическом сжатии грунта на УДН, необходимо решить уравнение движения грунта, которое имеет вид

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\partial \sigma}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0 \quad (5.3)$$

где ρ_0 – начальная плотность грунта, v – скорость частиц грунта при сжатии.

Уравнение одномерного движения грунта в УДН (5.3) последовательно замыкается уравнениями состояния грунта (5.1). В замкнутой системе уравнений (5.3), (5.1) неизвестными являются σ , ε и v , которые являются параметрами волн в грунте. Начальные условия задачи являются нулевыми.

Граничные условия задачи, соответствующие постановке эксперимента, следующие: при $x = 0$ на верхнюю плоскость слоя грунта в УДН действует нагрузка $\sigma = \sigma(t)$ посредством движения верхнего поршня; при $x = x_*$ неподвижен нижний поршень, то есть $v = 0$.

Математическая формулировка граничных условий имеет следующий вид

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma(t) \quad \text{при} \quad x = 0; \quad 0 < t < t_* \\ \sigma &= 0 \quad \text{при} \quad x = 0; \quad t > t_* \\ v &= 0 \quad \text{при} \quad x = x_* \end{aligned} \quad (5.4)$$

На фронте падающей волны выполняется условие

$$\langle \sigma \rangle = 0, \quad \langle \varepsilon \rangle = 0, \quad \langle v \rangle = 0 \quad \text{при} \quad x = ct \quad (5.5)$$

где c – скорость распространения продольных волн в грунте, $\langle \sigma \rangle$, $\langle \varepsilon \rangle$, $\langle v \rangle$ – скачки параметров волн.

В случае уравнений состояния (5.1) линия фронта $x = ct$ и линии всех других фронтов являются прямыми линиями. Это вытекает из линейности уравнений, составляющих закон деформирования грунта (5.1).

Таким образом, процесс динамического деформирования грунта, размещенного в УДН, описывается системой уравнений (5.1), (5.3). Волновая картина, соответствующая этому процессу, изображена на рис. 1. Решив систему уравнений (5.3), (5.1) с граничными условиями (5.4), (5.5) и нулевыми начальными условиями, можем определить параметры волновых процессов, происходящих при проведении экспериментов на УДН.

6. Метод и алгоритм решения задачи о динамическом сжатии грунта на установке динамических нагрузений. Система уравнений (5.3), (5.1) – гиперболическая [27]. В настоящее время получить аналитическое решение этих уравнений не представляется возможным. Поэтому воспользуемся приближенными методами. Следуя [27], воспользуемся методом характеристик, так как гиперболическая система (5.3), (5.1) имеет действительные характеристики и характеристические соотношения на них [18, 20, 27].

В результате применения метода характеристик, дифференциальные уравнения в частных производных (5.3), (5.1) приводятся к обыкновенным дифференциальным

уравнениям. Применение конечно-разностного метода к обыкновенным дифференциальным уравнениям повышает точность их решения, чем при их применении к дифференциальным уравнениям в частных производных [27].

Уравнения характеристик и характеристические соотношения подробно приведены в [18, 20]. Решение системы уравнений (5.3), (5.1) с применением метода характеристик и с использованием характеристических соотношений вдоль характеристических линий, проведено на ЭВМ, применяя неявную конечно-разностную схему с использованием безразмерных переменных и параметров [18, 20]. Переход к безразмерным переменным уменьшает ошибки при численных расчетах, связанных с их накоплением при вычислениях. Далее безразмерные результаты переводятся опять на размерные. Подробности этого метода приведены в [18, 20].

7. Результаты расчетов параметров волн в грунте. Закономерности распространения плоских волн в грунтах как упруго-вязкопластических средах теоретически исследованы в работах [18, 20]. Решение теоретической задачи по вышеприведенной методике, в случае, когда уравнение состояния грунта является линейной вязкоупругой средой (стандартно-линейное тело), проводилось численно методом характеристик в [18, 20]. В [18, 20] рассмотрены задачи взаимодействия волн с движущейся недеформируемой преградой в вязкопластической среде – грунте. Взаимодействие волны с деформируемой преградой в вязкоупругой среде исследовано в [20].

Взаимодействие непрерывной волны сжатия с жесткой неподвижной преградой в упруго-вязкопластической среде в настоящее время не исследованы. Следовательно, решение рассматриваемой здесь задачи получено впервые.

Однако, рассматриваемая задача о взаимодействии плоской непрерывной волны сжатия с жесткой неподвижной преградой в упруго-вязкопластической среде – грунте, здесь исследуется применительно к УДН в целях достоверного определения механических характеристик лессовых грунтов.

Основными параметрами (исходными данными) задачи для проведения расчетов являются

- характеристики грунта – $\gamma = E_D/E_S$, $\beta = E_D/E_R$, ρ_0 , c , μ ;
- характеристики нагрузки – σ_{\max} , t^* ;
- расстояния от начального сечения грунта до преграды – x^* .

В расчетах используются приближенные значения механических характеристик лессового грунта, т.е. E_D , E_S и E_R . Приближенное значение μ , определяется следующим образом. На основании первого уравнения (5.1) параметр вязкости при допущении постоянными и известными значения $d\varepsilon/dt$ и $d\sigma/dt$, а также E_D и E_S , можно приближенно определить по формуле [18]

$$\mu = \left(\frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{d\sigma}{E_D dt} \right) / \left(\frac{\sigma}{E_S} \right) \quad (7.1)$$

Из результатов опытов известно, что $d\varepsilon/dt = 1 \text{ с}^{-1}$, $d\sigma/dt = 10 \text{ МПа/с}$. При значениях $E_D = 14 \text{ МПа}$ и $E_S = 6.5 \text{ МПа}$, определенного из рис. 2 и значения $\sigma = 0.27 \text{ МПа}$ при $\varepsilon = 0.02$ для линейного участка динамической диаграммы $\sigma(\varepsilon)$ по формуле (7.1) получим $\mu = 7 \text{ с}^{-1}$. Это значение μ значительно меньше, чем значение $\mu = 1000 \text{ с}^{-1}$ для лессового грунта, приведенное в [19]. Поэтому в расчетах принимаем $\mu = 100 \text{ с}^{-1}$. Значение $c = \sqrt{E_D/\rho_0} = 96.6 \text{ м/с}$ при $E_D = 14 \text{ МПа}$ и $\rho_0 = 1500 \text{ кг/м}^3$.

Используя приближенные экспериментальные значения E_D , E_S , E_R , c и μ получим на основе численного решения задачи, адекватной эксперименту, теоретические зависимости $\sigma(t)$, $\varepsilon(t)$, $\sigma(\varepsilon)$.

Расчеты на ЭВМ проведены при различных значениях этих параметров. При этом, исходя из результатов опытов на УДН, значение максимальной нагрузки σ_{\max} для всех

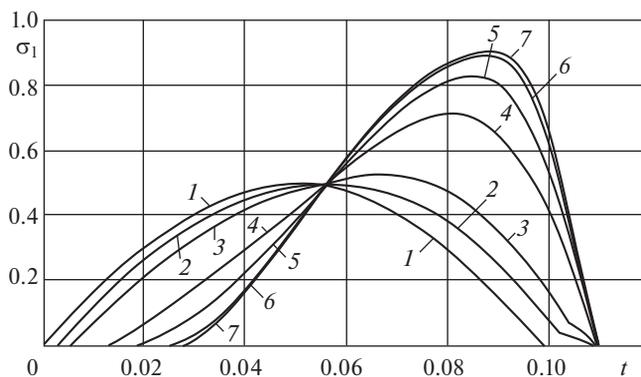


Рис. 3

вариантов было принято 0.5 МПа. Начальная плотность грунта ρ_0 равнялась 1500 кг/м³, скорость распространения продольных волн $c = 100$ м/с.

Рассмотрим результаты расчетов, полученных на ЭВМ.

На рис. 3 приведены изменения продольных напряжений σ по времени t для фиксированных сечений грунта при $\gamma = 2$, $\beta = 0.5$, $x_* = 2.83$ м, $t_* = 0.1$ с, $\mu = 100$ с⁻¹. Кривые 1–7, соответственно, относятся к сечениям грунта при $x = 0$; 0.283; 0.566; 1.1414; 1.1981; 2.547 и 2.83 м. При $x = x_* = 2.83$ м имеется неподвижная и недеформируемая преграда (нижний поршень УДН).

В теоретических расчетах имеется возможность произвольно расположить нижний поршень установки. В этом варианте преграда (нижний поршень) специально отведена на расстояние $x_* = 2.83$ м, чтобы рассмотреть закономерности изменения параметров волны в грунте в этом случае соответствующей постановке натурных экспериментов [19].

На рис. 3, согласно условиям (5.4), на грунт при $x = 0$ действует полупериод синусоидальной нагрузки (кривая 1). На расстоянии $x = 2.83$ м находится нижний поршень установки (преграда). В этом варианте за время действия нагрузки $t_* = 0.1$ с волна 3.5 раза успевает пробежать до преграды и обратно. В результате наложения волн, отраженных от нижнего и верхнего поршней (преград), наблюдаются различные значения напряжений на разных сечениях грунтового слоя также как в эксперименте [19]. Максимальное значение напряжения в сечениях грунтового слоя, начиная от начального, увеличивается. На преграде максимальное напряжение в 1.8 раза больше, чем в начальном сечении. Аналогичная картина наблюдается в зависимостях $\epsilon(t)$ (рис. 4). Здесь также максимальная деформация достигается на преграде. Значения остаточных деформаций в сечениях грунта существенны. Кривые 1–7 относятся к тем же расстояниям, что и на рис. 3.

Зависимости $\sigma(t)$ и $\epsilon(t)$, приведенные на рис. 3 и рис. 4 показывают, что изменения напряжения и деформации в различных сечениях грунтового слоя при воздействии динамических нагрузок различны. Это обстоятельство необходимо учесть при проведении аналогичных экспериментов [19].

Из рис. 3 и рис. 4 видно, что волновые процессы в грунтовом слое при его достаточной толщине представляют собой сложную картину.

Диаграммы сжатия для рассматриваемых сечений грунта приведены на рис. 5. Здесь наблюдается упруго-вязкопластическое деформирование грунта во всех сечениях слоя. Однако, количественно эти зависимости $\sigma(\epsilon)$ для различных сечений грунта раз-

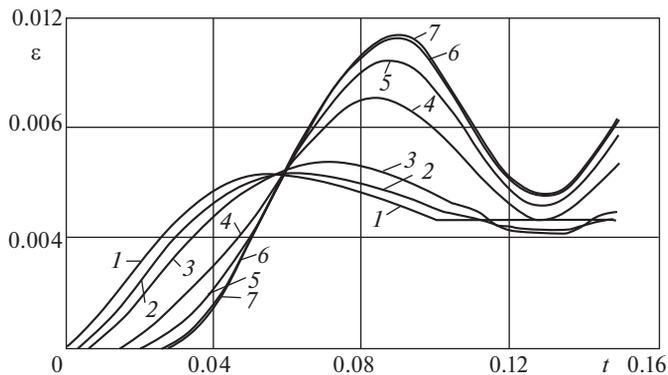


Рис. 4

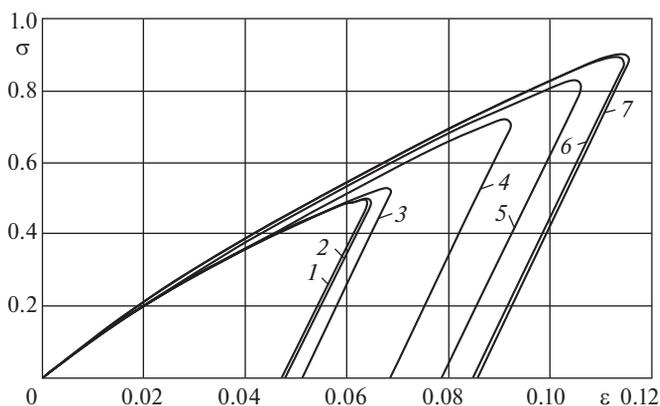


Рис. 5

ные. При рассмотренных значениях исходных данных, на результатах расчетов наблюдаются значительные остаточные деформации грунта. Максимальные значения напряжения незначительно отстают от максимальных значений деформации.

В случае уменьшения расстояния от начального сечения до преграды в 10 раз ($x_* = 0.283$ м) при тех же исходных данных в грунтовом слое наблюдается существенно другая волновая картина.

На рис. 6 приведены изменения напряжения для сечений грунтового слоя при $x = 0$; 0.0283; 0.0566; 0.1414; 0.1981; 0.2547 и 0.283 м, соответственно, для кривых 1–7. Здесь $x_* = 0.283$ м, то есть преграда находится на расстоянии 0.283 м от начального сечения грунта. Из рис. 6 видно, что в этом случае значения напряжения во всех сечениях грунтового слоя практически одинаковые (кривые 1–7). При уменьшении x_* , значения деформаций для всех сечений также сливаются в одну кривую.

Результаты расчетов (рис. 6) показывают, что уже при толщине слоя грунта δ , равной 0.283 м, что в десять раз больше, чем в опытах на УДН, для данной динамической нагрузки условия квазистатичности сжатия грунта практически выполняются, то есть значения напряжений и деформаций для всех сечений грунта становятся одинаковы-

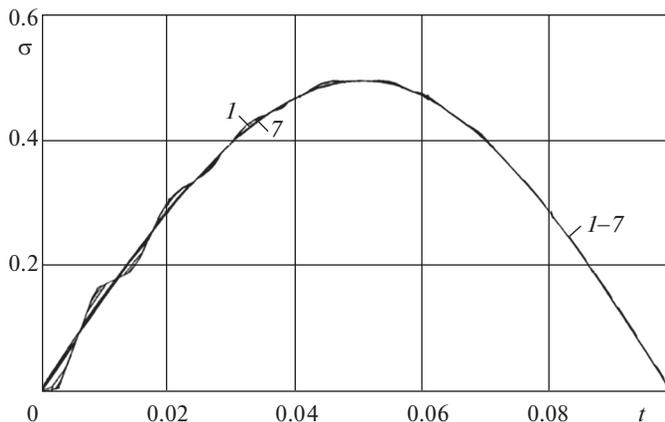


Рис. 6

ми. Однако это обстоятельство зависит не только от толщины слоя грунта, но и от параметров динамической нагрузки.

В целом, закономерности изменения параметров волны в грунте, как показывают результаты численных решений, зависят от характеристик грунта, от толщины грунтового слоя и, естественно, от характеристик динамической нагрузки. Последнее особенно важно для обеспечения квазистатичности процесса деформирования грунта в экспериментах.

Исследование этого вопроса рассмотрено на примерах расчета других вариантов.

Толщина слоя грунта в экспериментах на УДН равнялась $\delta = 0.03$ м. Исходя из этого, при выборе следующего варианта x_* принят 0.03 м и время действия нагрузки $t_* = 0.1$ с, что соответствует времени действия нагрузки в опытах на УДН (значения остальных исходных данных не изменялись). В этом варианте, зависимости $\sigma(t)$ для всех сечений слоя грунта были абсолютно одинаковые — как кривая *I* на рис. 3. Это доказывает полную квазистатичность процесса деформирования грунта на УДН при данной динамической нагрузке. В этом случае зависимости $\varepsilon(t)$ для всех сечений слоя грунта также полностью совпадают. Зависимости $\sigma(\varepsilon)$ для рассматриваемых сечений грунта, также абсолютно одинаковы для всех сечений.

Увеличение значения γ при постоянстве остальных параметров не влияет на зависимости $\sigma(t)$, $\varepsilon(t)$ качественно. Количественно они меняются. Увеличиваются максимальные и остаточные значения деформаций.

При увеличении γ диаграмма сжатия $\sigma(\varepsilon)$ остается одинаковой для всех сечений грунта. Увеличение γ , что соответствует увеличению вязких и пластических свойств среды, на квазистатичность процесса деформирования грунта на установке УДН, как показывают результаты расчетов, не влияет.

Уменьшение γ , что соответствует увеличению упругих характеристик грунта, также не влияет на квазистатичность процесса деформирования грунта на УДН.

При скорости распространения волны $c = 1000$ м/с ($\gamma = 1.05$), за время действия нагрузки $t_* = 0.1$ с волна успевает “пробежать” слой грунта толщиной 0.03 м более 3000 раз. Зависимости $\sigma(t)$ для всех сечений грунта совершенно одинаковые с исходной нагрузкой (кривая *I*, рис. 3).

При $\gamma = 1.05$ диаграмма сжатия грунта $\sigma(\varepsilon)$ соответствует диаграмме упругопластической среды. Здесь значения остаточных деформаций уменьшаются, максимальные

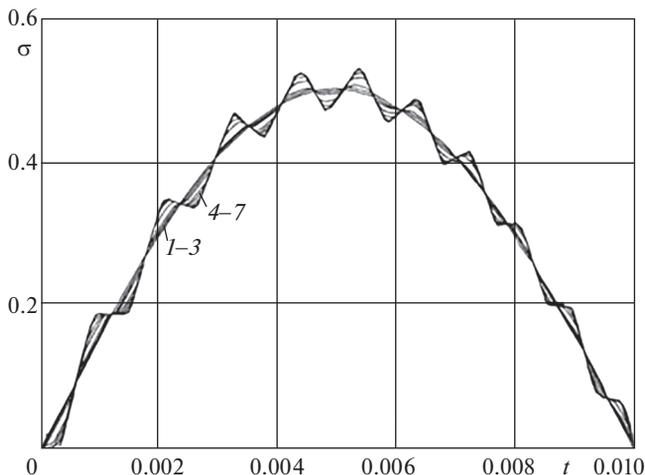


Рис. 7

значения напряжений и деформаций по времени совпадают. Однако квазистатичность процесса деформирования грунта не нарушается. Результаты расчетов показали, что изменения β не влияют на квазистатичность процесса деформирования грунта на УДН.

Уменьшение времени действия нагрузки t_* в 10 раз приводит к заметному нарушению квазистатичности процесса деформирования грунта (рис. 7). В этом случае значения напряжений в сечениях слоя грунта отличаются на 10–15%. Аналогичные отличия наблюдаются в значениях деформаций. Нарушение квазистатичности процесса также наблюдается в зависимостях $\sigma(\epsilon)$. Квазистатичность процесса заметно нарушается, особенно, в стадии разгрузки слоя грунта.

Уменьшение времени действия нагрузки t_* в 100 раз приводит к явному нарушению квазистатичности процесса деформирования грунта в УДН. При $t_* = 0.001$ с значения напряжений и деформаций в рассматриваемых сечениях слоя грунта существенно различны. На верхнем и нижнем поршнях их значения отличаются примерно в два раза. При уменьшении времени действия динамической нагрузки на значения напряжения и деформации существенно влияют волны, отраженные от нижнего поршня.

Значительно изменились и зависимости $\sigma(\epsilon)$ при $t_* = 0.001$ с. Процесс деформирования грунта стал упруго-пластическим. При разгрузке грунта квазистатичность процесса полностью нарушается.

Результаты расчетов, приведенные выше, позволяют оценить квазистатичность процесса деформирования грунта на УДН по формуле

$$\lambda/x_* = ct_*/\delta > 50 \quad (7.2)$$

где λ – полудлина волны.

При отношении полудлины волны к толщине слоя грунта δ больше 50 вполне обеспечивается квазистатичность процесса деформирования при динамическом сжатии грунта на УДН. Чем больше значение отношения λ/δ тем выше квазистатичность процесса деформирования грунта, следовательно, достоверность результатов опытов, полученных на УДН.

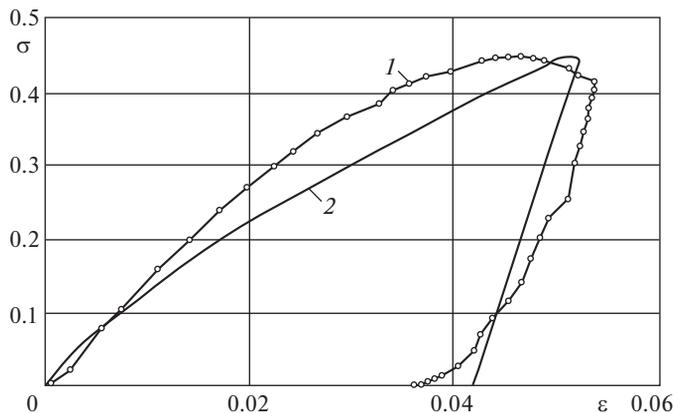


Рис. 8

8. Уточненные значения упругих, пластических и вязких характеристик лессовых грунтов. Используя приближенные экспериментальные значения механических характеристик грунтов, определенные из результатов опытов, то есть $E_D = 14$ МПа, $E_S = 6.5$ МПа, $E_R = 28.6$ МПа, $\mu = 100$ с⁻¹, $\gamma = E_D/E_S = 2.154$, $\beta = E_D/E_R = 0.5$ на основе решения задачи, адекватной постановке эксперимента, построим теоретические зависимости $\sigma(t)$, $\epsilon(t)$, $\sigma(\epsilon)$. При $x_* = \delta = 0.03$ м, зависимости $\sigma(t)$ во всех сечениях грунта полностью совпадают. При выполнении условий квазистатичности процесса динамического сжатия образца грунта, это вполне ожидаемый результат. При решении теоретической задачи за нагрузку, действующую на верхнюю поверхность грунтового слоя, при $x = 0$ принята экспериментальная зависимость $\sigma(t)$, полученная датчиком в центре верхнего поршня УДН. Согласно опытным изменениям напряжения по времени $\sigma_{\max} = 0.441$ МПа, $t = 0.1$ с. При этих параметрах нагрузки, как уже отмечалось, условие квазистатичности деформирования грунта (7.2) выполняется хорошо. Далее варьируя поочередно значениями E_S , E_D и μ можно добиться достаточно хорошего совпадения $\epsilon(t)$, $\sigma(\epsilon)$.

При значениях $E_S = 8.3$ МПа, $E_D = 20.75$ МПа, $\mu = 200$ с⁻¹, $\beta = 0.5$, $\gamma = 2.5$, $c = 116.5$ м/с, как показывают результаты расчетов (рис. 8), опытные и расчетные зависимости $\sigma(\epsilon)$ (кривая 1 — эксперимент, кривая 2 — теория) имеют удовлетворительное совпадение. Их расхождения составляют около 10–15%. Это достаточно хорошее совпадение экспериментальных и теоретических результатов. Добиться такого совпадения удалось в результате изменения (уточнения) первоначальных механических характеристик грунтов, непосредственно определенных по результатам экспериментальных данных. Как показывают результаты вышеприведенных исследований, первоначальные значения механических характеристик грунтов были неточны. Они могут быть уточнены в результате их сравнения с теоретическими расчетными данными.

В табл. 1 приведены ориентировочные значения механических характеристик лессового грунта, определенные по результатам экспериментов, и уточненные их значения, полученные по методике, предлагаемой в настоящей работе.

Из табл. 1 видно, что ориентировочные и уточненные механические характеристики лессовых грунтов отличаются друг от друга — от 16 до 900%. Эти данные получены при проведении опытов в лабораторных условиях. Результаты же экспериментов, проведенных в полевых, натуральных условиях будут иметь еще большее расхождение с тео-

Таблица 1

Механические характеристики лессового грунта	Ориентировоч- ные значения	Уточненные значения	Разность в %
Модуль статического сжатия E_S , МПа	6.5	8.3	27.7
Модуль динамического сжатия E_D , МПа	14.0	20.75	48.2
Модуль разгрузки E_R , МПа	28.6	41.5	31.1
Параметр вязкости μ , с^{-1}	20	200	900.0
Скорость продольных волн c , м/с	100	116.5	16.5
Плотность ρ , кг/м^3	1500	1500	–
$\gamma = E_D/E_S$	2.154	2.5	16
$\beta = E_D/E_R$	0.5	0.5	–

ретическими, так как в последнем случае постановка самих опытов является приближенной. Следовательно, применить статистические методы при обработке результатов данных опытов невозможно.

Результаты исследований, приведенные в табл. 1, показывают, что предлагаемая в данной работе методика существенно уточняет определение значений механических характеристик грунтов.

Таким образом, сопоставляя результаты экспериментальных и теоретических исследований по динамическому сжатию образцов грунтов, можно с более высокой точностью определить значения механических характеристик грунтов.

Заключение. На установке динамических нагружений (УДН) разработанной ИПМех РАН, проведены серии лабораторных экспериментов и определены диаграммы сжатия лессовых грунтов $\sigma_1(\epsilon_1)$ при динамических и статических нагрузках.

На основе экспериментальных диаграмм сжатия грунтов $\sigma_1(\epsilon_1)$ установлено, что при относительно небольших $\sigma_{1\text{max}} = 0.5$ МПа нагрузках лессовые грунты при деформировании проявляют вязкие и пластические свойства и эти свойства описываются упруго-вязкопластической моделью Г.М. Ляхова. Определены параметры упруго-вязкопластической модели из результатов опытов, как механические характеристики лессовых грунтов.

Численным решением волновой задачи адекватной постановки эксперимента на УДН, исследованы волновые процессы в грунте при динамическом деформировании и на основе их анализа выведено условие квазистатичности при динамическом сжатии грунта на УДН.

Сопоставлением результатов эксперимента с численным решением при различных значениях механических характеристик грунта определены уточненные значения этих характеристик, являющихся параметрами упруго-вязкопластической модели Г.М. Ляхова.

Таким образом, обоснован предложенный метод определения механических характеристик грунтов, включающий экспериментальное и теоретическое определение диаграммы сжатия грунтов $\sigma_1(\epsilon_1)$ и на последовательном приближении теоретической диаграммы $\sigma_1(\epsilon_1)$ к экспериментальной при варьировании механических характеристик грунта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Giretti D., Fioravante V., Been K., Dickenson S.* Mechanical properties of a carbonate sand from a dredged hydraulic fill // *Géotechnique*, 2018. V. 68. Issue 5. P. 410–420.
2. *Apichat Suddepong, Jinchun Chai, Shuilong Shen, John Carter.* Deformation behaviour of clay under repeated one-dimensional unloading–reloading // *Canadian Geotechnical J.* 2015. V. 52. № 8. P. 1035–1044.
3. *Satoshi Nishimura.* Assessment of anisotropic elastic parameters of saturated clay measured in triaxial apparatus: Appraisal of techniques and derivation procedures // *Soils and Foundations*. 2014. V. 54. Issue 3. P. 364–376.
4. *Mitaritonna G., Amorosi A., Cotecchia F.* Experimental investigation of the evolution of elastic stiffness anisotropy in a clayey soil // *Géotechnique*. 2014. V. 64. Issue 6. P. 463–475.
5. *Wissem Frikha, Fakhr Tounekti, Wassim Kaffel, Mounir Bouassida.* Experimental study for the mechanical characterization of Tunis soft soil reinforced by a group of sand columns // *Soils and Foundations*, 2015. V. 55. Issue 1. P. 181–191.
6. *Abdi H., Labrie D., Nguyen T.S., Barnichon J.D., Su G., Evgin E., Simon R., Fall M.* Laboratory investigation on the mechanical behaviour of Tournemire argillite // *Canadian Geotechnical J.* 2015. V. 52. № 3. P. 268–282.
7. *Stanislav Lenart, Junichi Koseki, Yukika Miyashita, Takeshi Sato.* Large-scale triaxial tests of dense gravel material at low confining pressures // *Soils and Foundations*. 2014. V. 54. Issue 1. P. 45–55.
8. *Daniela Porcino, Vito Nicola Ghionna, Raffaella Granata, Vincenzo Marciánò.* Laboratory determination of mechanical and hydraulic properties of chemically grouted sands // *Geomechanics and Geoen지니어ing*. Int. J. 2016. V. 11. Issue 2. P. 164–175.
9. *Konsam Rambha Devi, Ramendu Bikas Sahu, Sibapriya Mukherjee.* Response of organic clay under cyclic loading // *Int. J. Geotechnical Eng.* 2014. V. 8. Issue 2. P. 130–143.
10. *Hui Zhou, Yanshuang Yang, Chuangqing Zhang, Dawei Hu.* Experimental investigations on loading-rate dependency of compressive and tensile mechanical behaviour of hard rocks // *Eur. J. Environmental and Civil Engineering*. 2015. V. 19. Issue s1. P. s70–s82.
11. *Kostas Senetakis, Anastasios Anastasiadis, Kyriazis Pitilakis.* Normalized shear modulus reduction and damping ratio curves of quartz sand and rhyolitic crushed rock // *Soils and Foundations*. 2013. V. 53. Issue 6. P. 879–893.
12. *Morton J.P., O’Loughlin C.D., White D.J.* Estimation of soil strength in fine-grained soils by instrumented free-fall sphere tests // *Géotechnique*. 2016. V. 66. Issue 12. P. 959–968.
13. *Chow S.H., O’loughlin C.D., Randolph M.F.* Soil strength estimation and pore pressure dissipation for free-fall piezocone in soft clay // *Géotechnique*. 2014. V. 64. Issue 10. P. 817–827.
14. *Daniela Porcino, Vincenzo Marciánò, Raffaella Granata.* Static and dynamic properties of a lightly cemented silicate-grouted sand // *Can. Geotechnical J.* 2012. V. 49. № 10. P. 1117–1133.
15. *Cengiz Kurtulus, Maral Üçkardeş, Umut Sarır, Onur Güner S.* Experimental studies in wave propagation across a jointed rock mass // *Bulletin of Engineering Geology and Environment*. 2011. V. 71. № 2. P. 231–234.
16. *Рыков Г.В., Скобеев А.М.* Измерение напряжений в грунтах при кратковременных нагрузках. М.: Наука, 1978. 168 с.
17. *Кулинич Ю.В., Нарожная З.В., Рыков Г.В.* Механические характеристики песчаных и глинистых грунтов с учетом их вязкопластических свойств при кратковременных динамических нагрузках. Препринт № 69. ИПМ АН СССР, 1976. 66 с.
18. *Ляхов Г.М.* Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. М.: Наука, 1982. 238 с.
19. *Вовк А.А., Кравец В.Г., Ляхов Г.М., Плаксий В.А., Салицкая В.И., Султанов К.С.* Экспериментальное определение параметров взрывных волн и вязкопластических характеристик грунта // *Прикладная механика*. Киев, 1977. Т. XIII. № 7. С. 96–103.
20. *Султанов К.С.* Волновая теория сейсмостойкости подземных сооружений. Ташкент: Изд. “Фан”, 2016. 392 с.
21. *Султанов К.С.* Закономерности взаимодействия подземных сооружений с грунтом при их относительном сдвиге // *Прикладная механика*. Киев, 1993. Т. 29. № 3. С. 60–68.
22. *Султанов К.С., Баходиров А.А.* Законы сдвигового взаимодействия подземных сооружений с грунтами и их анализ // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2016. № 2. С. 5–10.
23. *Григорян С.С.* Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород // *ПММ*. 1967. Т. 31. № 4. С. 643–669.
24. *Султанов К.С.* Нелинейный закон деформирования мягких грунтов // *ПММ*. 1998. Т. 62. № 3. С. 503–511.
25. *Султанов К.С., Хусанов Б.Э.* Уравнения состояния просадочных грунтов с учетом увлажненности // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2001. № 3. С. 7–11.
26. *Султанов К.С., Хусанов Б.Э.* Определение просадки нелинейно-деформируемого грунтового массива при увлажнении // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2002. № 3. С. 2–4.
27. *Кукуджанов В.Н.* Вычислительная механика сплошных сред. М.: Физматлит, 2008. 320 с.