

ПОЛЗУЧЕСТЬ И ВИБРОПОЛЗУЧЕСТЬ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

ТЕР-МАРТИРОСЯН З.Г.

Заведующий кафедрой механики грунтов и геотехники (МГГ) Московского государственного строительного университета (МГСУ), д.т.н., профессор, г. Москва
mgroif@mail.ru

ТЕР-МАРТИРОСЯН А.З.

Доцент кафедры МГГ МГСУ, к.т.н., г. Москва
gic-mgsu@mail.ru

СОБОЛЕВ Е.С.

Инженер и аспирант кафедры МГГ МГСУ, г. Москва
SobolevES@mgsu.ru

Аннотация

В работе изложены результаты исследований реологических свойств песчаных грунтов с целью определения их вязкости при кинематическом и динамическом режиме трехосных испытаний. Представлена методика определения вязкости по данным трехосных испытаний в кинематическом режиме (с контролем скорости вертикальных перемещений). Рассмотрено влияние динамических нагрузок на вязкость песчаных грунтов

Ключевые слова

Ползучесть; виброползучесть; трехосные испытания; песчаные грунты; вязкость.

В настоящее время методы прогнозирования напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтов требуют схематизации рассматриваемых явлений и процессов. Задача расчета НДС сводится к математическому описанию наблюдаемых реальных свойств грунтовой среды. При этом в зависимости от комплекса поставленных задач выделяют наиболее важные факторы, а все остальные не учитывают. В результате создается расчетная модель, или расчетная схема грунта, частично отражающая действительную природу рассматриваемого процесса в нем.

По мере развития экспериментальных исследований процессов, происходящих в грунтах, возникают новые расчетные модели, более полно учитывающие особенности описываемых явлений и, как правило, в математическом и расчетном отношении более сложные. При этом более простые, более «грубые» или менее полные модели не теряют практического смысла, но происходит неизбежное сужение областей их практического использования. Область применимости каждой модели оценивается на основании практического опыта и особенно экспериментов.

Любая математическая модель грунта характеризуется комплексом уравнений, определяющих поведение среды в рассматриваемом процессе. При этом любой модели соответствует некоторая идеализация и схематизация свойств реальных сред, определенных по результатам экспериментов и натурных наблюдений.

В настоящее время получили распространение модели, учитывающие деформационные свойства грунтов. В реальных условиях при динамических воздействиях наблюдаются необратимые деформации, которые связаны с преодолением сил трения, неупругого сопротивления (внутреннего трения) и рассеивания энергии в окружающий массив. Вязкопластическое поведение тел может быть рассмотрено более наглядным и физически понятным способом путем введения пружинно-демпферных моделей. В данном типе моделей носитель упругих свойств представлен пружиной. Такие элементы соединяются параллельно или

последовательно. Потери энергии при деформировании тел могут происходить при различных внутренних механизмах. Отметим, что в виде демпфера можно представить потери энергии, происходящие только из-за вязкости (то есть деформирование, пропорциональное скорости деформации).

Модель Максвелла состоит из пружины и демпфера, соединенных последовательно, как показано на рис. 1. В этой модели сдвиговое напряжение σ_i воспринимается обычным образом, а общая относительная сдвиговая деформация e_i состоит из двух частей - деформации сдвига пружины e_{i1} и деформации сдвига демпфера e_{i2} . Каждый компонент связан с касательными напряжениями следующим образом: $\sigma_i = Ge_{i1}$ и $\sigma_i = \eta de_{i2}/dt$ (где σ_i - касательное напряжение; G - модуль сдвига; η - вязкость; t - время). Поэтому зависимость между напряжениями и относительными сдвиговыми деформациями в модели Максвелла получается через соотношение $e_i = e_{i1} + e_{i2}$ в следующем виде:

$$\frac{\sigma_i}{\eta} + \frac{1}{G} \frac{d\sigma_i}{dt} = \frac{de_i}{dt} \quad (1)$$

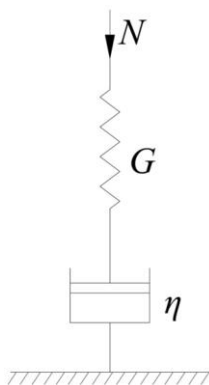


Рис. 1. Реологическая модель Максвелла: N - нагрузка; G - модуль сдвига; η - вязкость

Модель Максвелла используется для описания релаксационного поведения материала, подвергающегося воздействию деформации постоянной величины.

Решение дифференциального уравнения (1) для случая, когда скорость деформаций сдвига постоянна, имеет вид:

$$\sigma_i(t) = \dot{e}_i \eta \cdot \left(\ln \left[G \frac{t}{\eta} \right] - 1 \right) \quad (2)$$

где $\dot{e}_i = de_i/dt$ - скорость сдвиговой деформации (в данном случае $\dot{e}_i = \text{const}$).

Уравнение (2) позволяет определить значение касательных напряжений в грунтах в любой момент времени в зависимости от скорости деформации сдвига, модуля сдвига и вязкости грунта. Его решение в графическом виде с помощью программного комплекса MathCAD представлено на рис. 2.

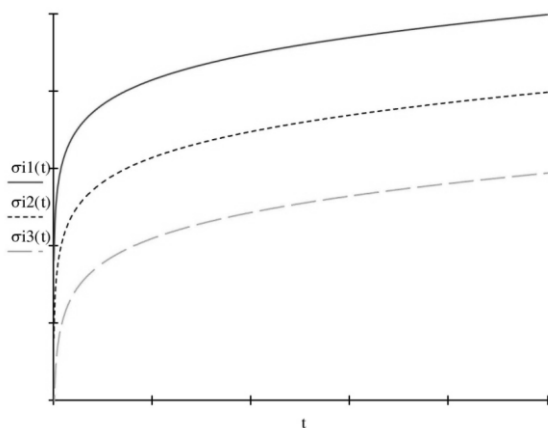


Рис. 2. Графики зависимости касательных напряжений σ_i от времени t (решение уравнения (3) в программном комплексе MathCAD при $\sigma_{i1} > \sigma_{i2} > \sigma_{i3}$)

Вязкость, или внутренне трение, - одно из явлений переноса, свойство тел оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. В результате происходит рассеяние энергии в виде тепла, затрачиваемого на это перемещение.

Механизм внутреннего трения заключается в том, что хаотически движущиеся молекулы переносят импульс из одного слоя в другой, что приводит к выравниванию скоростей. Это описывается введением силы трения.

Различают динамическую вязкость (Па·с) и кинематическую вязкость ($\text{м}^2/\text{с}$). Последняя может быть получена как отношение динамической вязкости к плотности вещества и своим происхождением обязана классическим методам измерения вязкости, таким как измерение времени вытекания заданного объема исследуемого материала через калиброванное отверстие под действием силы тяжести. Специальный прибор для измерения вязкости называется вискозиметром.

В настоящем исследовании предполагается определить вязкость песчаных грунтов по результатам их стандартных трехосных испытаний при постоянной скорости приложения вертикальных деформаций.

Установки для трехосного сжатия ГТ 0.3.13 производства НПП «Геотек» (г. Пенза) обеспечивают определение характеристик прочности и деформируемости: угла внутреннего трения, удельного сцепления, модулей деформации, коэффициента поперечной деформации для песчаных грунтов. Испытания выполняются по консолидированно-дренированной схеме. Всестороннее обжатие производится дистиллированной водой при помощи гидравлического компенсатора. Датчики бокового и порового давления размещаются непосредственно в камере трехосного сжатия, что обеспечивает более точные измерения. Испытания проводятся в соответствии с ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости».

Песчаные образцы-близнецы грунта подготавливались методом разгрузки. Суть метода состоит в том, что при различных значениях обжимающих давлений плотность образцов получается разной. Для того чтобы избежать этого, их каждый раз нагружают всесторонним обжатием до 400 кПа и после выдержки снижают давление до 100 или 200 кПа в зависимости от стадии испытания. Таким образом добиваются получения идентичных образцов с равной плотностью для корректного сравнения результатов испытаний. Кроме того, такой метод подготовки образцов позволяет определить степень влияния их бокового обжатия на контролируемые параметры вне зависимости от их плотности.

По результатам испытаний были построены паспорта прочности песчаного грунта при различных скоростях приложения вертикальных перемещений (рис. 3). Установки ГТ 0.3.13 позволяют проводить испытания с заданной скоростью перемещений при ее строго определенных значениях. В эксперименте они были приняты равными 0,005; 0,05 и 0,5 мм/мин.

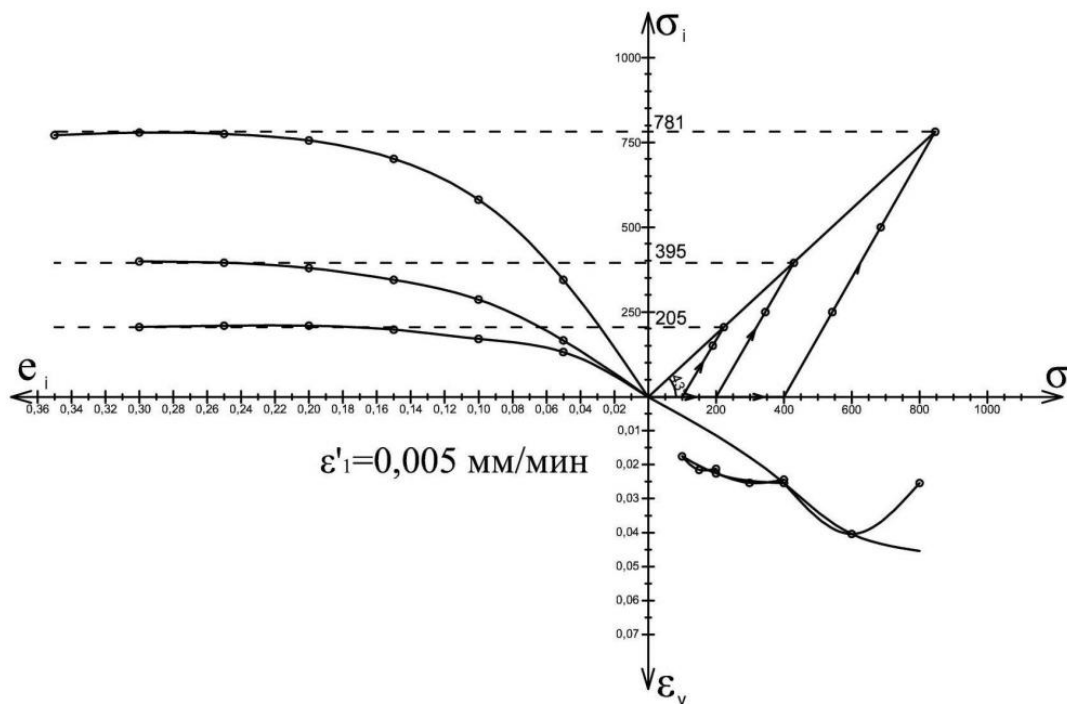


Рис. 3. Паспорт прочности песчаного грунта по результатам трехосных испытаний в кинематическом режиме нагружения с постоянной скоростью приложения вертикальных перемещений 0,005 мм/мин.: e_i - относительная деформация сдвига, д.ед.; σ_i - касательное напряжение, кПа; ϵ_v - объемная деформация, д.е.; σ' - среднее напряжение, кПа

Используя данные испытаний с различными скоростями нагружения образцов, можно получить значения вязкости грунта, зависящие от интенсивности касательных напряжений, из формулы (2). На основании этой формулы можно с помощью программного комплекса MathCAD решить уравнение относительно неизвестных G и η . Таким образом можно получить значение вязкости $\eta = 8 \times 10^9$ Па·с и модуль сдвига $G = 6,5$ МПа, если принять скорость сдвиговых деформаций $de_i/dt = \text{const} = 0,5$ (д.ед./с) в интервале времени от 0 до 500 секунд испытания. Аналогичным образом можно получить значения вязкости и модуля сдвига грунта, если принять скорость сдвиговых деформаций $de_i/dt = \text{const} = 0,05$ ($\eta = 5 \times 10^9$ Па·с и $G = 5,5$ МПа) и $de_i/dt = \text{const} = 0,005$ ($\eta = 4,7 \times 10^9$ Па·с и $G = 5,5$ МПа).

Таким образом, по результатам трехосных испытаний в кинематическом режиме (с контролем скорости вертикальных деформаций) были получены значения вязкости сухого песчаного грунта в соответствии с упруговязкой реологической моделью Максвелла.

Вязкость грунтов имеет большое значение для прогноза их поведения во времени. Кроме того, ее важно учитывать при прогнозировании напряженно-деформированного состояния грунтов при вибрационных воздействиях [1]. В процессе исследования была выдвинута гипотеза о том, что при динамическом нагружении грунта вязкость будет переменной во времени.

Для проведения динамических испытаний применялось оборудование марки Wille Geotechnik (производства немецкой фирмы APS Antriebs- Pruf- und Steuertechnik GmbH), включающее сервогидравлическую нагрузочную раму с предельным осевым усилием 63 кН, камеру трехосного сжатия, блок управления сервогидравлическим приводом, блок обработки данных, поступающих с датчиков давлений и перемещений, блок управления давлением воздуха, разделитель сред, бюретку с дифференциальным датчиком объемных деформаций и управляющий компьютер. В процессе испытания в автоматическом режиме (с использованием программного обеспечения GEOsys 8.7.8) реализуется заданная траектория нагружения. При этом измеряются

следующие величины: вертикальное осевое усилие (датчиком силы на штоке поршня); вертикальное перемещение верхнего штампа (LVDT-датчиком на штоке); давление в камере (блоком управления давлением воздуха). Испытания проводились в камерах типа «А», предназначенных для образцов высотой 140 мм и диаметром 70 мм.

Динамические испытания проводились по консолидированно-недренированной схеме на образцах-близнецах песчано-пылеватого грунта, приготовленных методом разгрузки. Испытания проводились с контролем вертикальных напряжений (при постоянной амплитуде напряжений ± 30 кПа) и при частотах вибраций f , равных 5, 25, 50, 75 и 100 Гц. Заданная величина всестороннего обжатия составляла 400 кПа. Величина девиатора напряжений была задана равной 70% от разрушающего усилия. После приложения девиатора включалась вибрация с заданными частотами. Ее общая продолжительность на каждой частоте составляла 900 с. Схема нагружения образца представлена на рис. 4. По результатам проведенных трехосных испытаний в вибрационном режиме были построены зависимости вертикальных перемещений от времени (рис. 5).

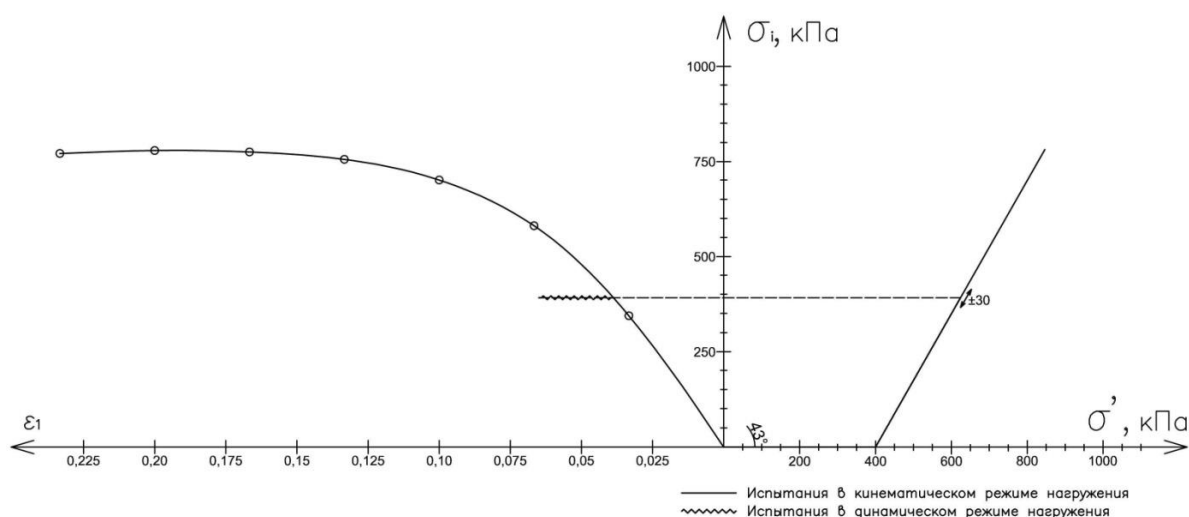


Рис. 4. Результаты трехосных испытаний песчано-пылеватого грунта в кинематическом и динамическом режимах. Зависимости касательных напряжений σ_i (кПа) от относительных вертикальных деформаций ε_1 (д.ед.) и средних напряжений σ' (кПа)

Вязкость во время вибрационного нагружения определялась после 56, 112, 225, 450, 675 и 900 секунд вибрации в соответствии со следующей зависимостью:

$$\eta(t) = \frac{\sigma_i}{\dot{\varepsilon}_1(t)}, \quad (3)$$

где σ_i - касательные напряжения, в данном случае установленные на уровне $3 \cdot 10^4$ Па; $\dot{\varepsilon}_1$ - скорость вертикальных деформаций, с^{-1} .

Скорость вертикальных деформаций $\dot{\varepsilon}_1$ в заданный момент времени определяется по формуле:

$$\dot{\varepsilon}_1(t) = \frac{\Delta\varepsilon_1}{\Delta t}, \quad (4)$$

где $\Delta\varepsilon_1$ - приращение вертикальных деформаций за интервал времени Δt .

Результаты вычисления вязкости по экспериментальным данным сведены в таблицу.

Таблица

Определение вязкости по результатам трехосных испытаний в динамическом режиме

Частота вибраций f , Гц	Время с момента начала испытания t , с	Касательное напряжение σ_i , Па	Приращение вертикальных деформаций $\Delta\varepsilon_1$, д.ед.	Интервал времени, за который произошло приращение верт. деф. $\Delta\varepsilon_1$, Δt , с	Скорость относительных вертикальных деформаций $\dot{\varepsilon}$ (д.ед./с)	Вязкость η , Па·с
5	0	$3 \cdot 10^4$	0	0	0	0
	56		0,00025	2,8	$8,9286 \times 10^{-5}$	$3,3600 \times 10^8$
	112		0,00025	7,0	$3,5714 \times 10^{-5}$	$8,4000 \times 10^8$
	225		0,00025	16,2	$1,5480 \times 10^{-5}$	$1,9380 \times 10^9$
	450		0,00025	71,2	$3,5112 \times 10^{-5}$	$8,5440 \times 10^9$
	675		0,00025	211,6	$1,1815 \times 10^{-5}$	$2,5392 \times 10^{10}$
	900		0,00025	390,4	$6,4037 \times 10^{-5}$	$4,6848 \times 10^{10}$
25	0	$3 \cdot 10^4$	0	0	0	0
	56		0,00025	2,3	$1,0870 \times 10^{-4}$	$2,7600 \times 10^8$
	112		0,00025	5,3	$4,7170 \times 10^{-5}$	$6,3600 \times 10^8$
	225		0,00025	13,9	$1,7986 \times 10^{-5}$	$1,6680 \times 10^9$
	450		0,00025	71,8	$3,4819 \times 10^{-6}$	$8,6160 \times 10^9$
	675		0,00025	155,4	$1,6088 \times 10^{-6}$	$1,8648 \times 10^{10}$
	900		0,00025	252,0	$9,9206 \times 10^{-7}$	$3,0240 \times 10^{10}$
75	0	$3 \cdot 10^4$	0	0	0	0
	56		0,00025	2,5	$1,0000 \times 10^{-4}$	$3,0000 \times 10^8$
	112		0,00025	5,1	$4,9020 \times 10^{-5}$	$6,1200 \times 10^8$
	225		0,00025	11,0	$2,2727 \times 10^{-5}$	$1,3200 \times 10^9$
	450		0,00025	29,9	$8,3612 \times 10^{-6}$	$3,5880 \times 10^9$
	675		0,00025	60,3	$4,1459 \times 10^{-6}$	$7,2360 \times 10^9$
	900		0,00025	102,6	$2,4366 \times 10^{-6}$	$1,2312 \times 10^{10}$
100	0	$3 \cdot 10^4$	0	0	0	0
	56		0,00025	0,7	$3,5714 \times 10^{-4}$	$8,4000 \times 10^7$
	112		0,00025	4,0	$6,2500 \times 10^{-5}$	$4,8000 \times 10^8$
	225		0,00025	8,0	$3,1250 \times 10^{-5}$	$9,6000 \times 10^8$
	450		0,00025	19,8	$1,2626 \times 10^{-5}$	$2,3760 \times 10^9$
	675		0,00025	42,8	$5,8411 \times 10^{-6}$	$5,1360 \times 10^9$
	900		0,00025	73,4	$3,4060 \times 10^{-6}$	$8,8080 \times 10^9$

В инженерной практике часто приходится сталкиваться с постепенным затуханием перемещений сооружения, то есть с затуханием во времени процесса ползучести. Следует предположить, что это явление связано с нарастанием плотности грунта под воздействием нагрузки от сооружения в процессе его осадки. Здесь можно провести некоторую аналогию с изменениями вязкости в процессе динамического испытания. Из результатов испытаний видно, что она в процессе приложения динамической нагрузки падает. И ко времени стабилизации вертикальной деформации значения вязкости приближаются к полученным при испытаниях с малыми скоростями деформирования (почти статическими). Вязкость в начале динамического испытания отличается от «статической» вязкости в 100 раз! Следовательно, грунт во время приложения динамических нагрузок ведет себя, как ньютоновская жидкость.

Вязкость резко падает в начале приложения нагрузки, что вызывает скачок вертикальных деформаций. Затем в процессе испытания плотность грунта увеличивается, вязкость постепенно возрастает и вертикальные деформации стабилизируются. Кроме того, показано, что с ростом частоты нагружения вязкость за то же время испытания остается гораздо меньшей величины, чем при воздействиях более низкой частоты.

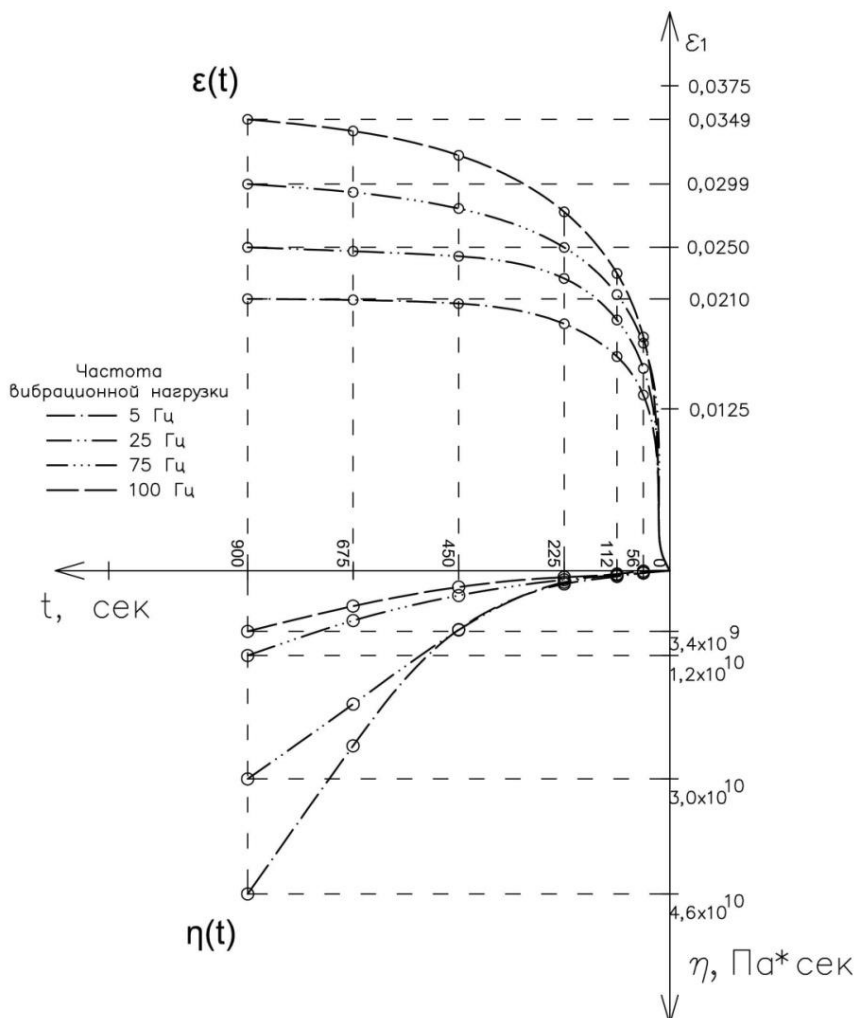


Рис. 5. Результаты трехосных испытаний с вибрационным нагружением. Зависимости вертикальных деформаций ε_1 и динамической вязкости η от времени t

На основании изложенного в статье можно сделать следующие основные выводы.

1. Долгосрочное прогнозирование напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов невозможно без учета реологических свойств грунтов. Решение данной задачи требует разработки новых моделей, в силу своей сложности включающих в себя множество различных параметров. Важное место среди них занимает вязкость, которая определяется различными способами. В частности, ранее были предложены способы определения вязкости в приборе кольцевого сдвига [4], а в полевых условиях с помощью кручения крыльчатки или опытной сваи под действием момента сил.

2. В настоящей работе изложены основы методики определения вязкости посредством использования результатов стандартных трехосных испытаний для определения прочностных характеристик песчаных грунтов.

3. Разработанная методика нуждается в дополнительных изысканиях и уточнениях, так как на практике предложенная модель грунтовой среды не описывает некоторые явления, наблюдавшиеся во время проведения испытаний (например, изменения пиковой и остаточной прочности песчаных грунтов [3]).

4. Проведены трехосные испытания песчаных грунтов в вибрационном режиме. Доказано, что вязкость песчаных грунтов при динамических воздействиях в 100 раз меньше, чем при кинематическом воздействии, что говорит об изменении фазового состояния грунта в процессе динамического нагружения. Грунт при приложении динамического воздействия переходит в состояние плотной жидкости, вязкость которой тем меньше, чем выше частота вибрационного воздействия.

Список литературы

1. Вознесенский Е.А. Динамическая неустойчивость грунтов: монография. М.: Эдиториал УРСС, 1999. 264 с.
2. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях / пер. с англ. под ред. А.Б. Фадеева, М.Б. Лисюка. СПб.: Изд-во НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006. 384 с.
3. Потапов А.Д., Платов Н.А., Лебедева М.Д. Песчаные грунты. М.: Изд-во АСВ, 2009. 256 с.
4. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов: монография. М.: Изд-во АСВ, 2009. 552 с.
5. Тер-Мартirosян З.Г. Реологические параметры грунтов и расчеты оснований сооружений: монография. М.: Стройиздат, 1990. 200 с.
6. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З. Деформации ползучести грунтов при циклическом и вибрационном воздействиях // Труды 18-го Польско-Российско-Словацкого семинара «Теоретические основы строительства», г. Москва - г. Архангельск, 01-05.07.2009. Варшава, 2009. С. 473-480.
7. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Мирный А.Ю., Соболев Е.С., Анжелю Г.О. Влияние частоты и длительности вибрационных трехосных испытаний в вибростабилометре на развитие дополнительных деформаций песчаных грунтов // Сборник статей научно-технической конференции «Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение», СПбГАСУ, Санкт-Петербург, 2014. С. 450-455.
8. ASTM 3999-96. Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus. USA: ASTM, 2003.
9. ASTM 5311-96. Standard test methods for load controlled cyclic triaxial strength of soil. USA: ASTM, 2000.
10. Maxfield B. Essential MATHCAD for Engineering, Science, and Math. Academic Press, 2009. 528 p.