

<https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-1-18-24-30>
УДК 624.131.439

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЕТОДОМ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ ENERGY APPROACH TO TRIAXIAL TESTING RESULTS INTERPRETATION

А. Ю. Мирный
A. Yu. Mirnyy

*Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119234,
Российская Федерация
Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119234, Russian
Federation*

MirnyyAY@mail.ru

Аннотация: В статье рассматривается возможность описания параллельно протекающих процессов в образце грунта на основании затрачиваемой на них энергии. Показано, что проведение испытаний методом трехосного сжатия в различных режимах дренирования и с различными траекториями изменения напряжений позволяют определить энергетические параметры, характеризующие упругое и пластическое деформирование, объемную и сдвиговую жесткость, дилатансию и контракцию, объемную жесткость поровой жидкости. Эти параметры характеризуют физический смысл протекающих процессов в большей степени, чем принятые параметры (модули) механики сплошного тела. Полученный результат может использоваться для разработки моделей нелинейного поведения дисперсных грунтов.

Abstract: The article considers the possibility of describing parallel processes in a soil sample based on the energy expended on them. It is shown that triaxial testing in various drainage modes and with different stress paths makes it possible to determine the energy parameters characterizing elastic and plastic strain, volumetric and shear stiffness, dilatancy and contraction, volumetric stiffness of the pore fluid. These parameters characterize the physical meaning of the ongoing processes to a greater extent than the accepted parameters (moduli) of solid mechanics. The obtained result can be used to develop models of nonlinear behavior of dispersed soils.

Ключевые слова: механика грунтов; удельная работа деформации; энергетический подход; пороговая деформация; модель грунта; нелинейное деформирование

Keywords: soil mechanics; specific work of strain; energy approach; threshold deformation; soil model; non-linear deformation

Введение

Исследование механических свойств дисперсных грунтов в значительной степени осложнено параллельным протеканием различных процессов. В ходе объемного деформирования происходит уплотнение, что, в свою очередь, приводит к образованию дополнительных контактов, изменению условий сопротивления сдвигу. С позиции теории пластичности этот процесс описывается упрочнением — ростом предела текучести по мере развития пластических деформаций.

В то же время при сдвиге наблюдаются явления, обусловленные дискретностью строения — дилатансия и контракция — которые вызывают изменение объема порового пространства. Как следствие, непосредственное определение взаимной зависи-

мости параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) затруднено. Различными исследователями были получены данные зависимости при тех или иных значениях сторонних факторов, например, степени плотности, водонасыщения, режима дренирования и т.д. Комплексный анализ этих данных, фактически, до сих пор не выполнен: большинство закономерностей механики грунтов носит феноменологический характер и не объясняет физической природы протекающих процессов.

Помимо многофакторности исследуемых процессов, фундаментальное описание закономерностей механического поведения дисперсных грунтов осложнено ограниченными возможностями испытательного оборудования. Ни в одной другой области материаловедения или, в более широком

смысле, механики твердого тела, не применяется такого большого количества приборов различных конструкций. Это объясняется практическими трудностями при попытке реализовать в образце однородное НДС, но так как большинство компонентов НДС являются векторными величинами, возникающие отклонения приводят к росту несоответствия между точным аналитическим решением и фактическим экспериментом. В совокупности с изменением структуры образца (а, как следствие, и физико-механических свойств) в ходе опыта это не позволяет однозначно интерпретировать результаты испытаний.

Теоретический анализ

Непосредственным методом описания механического поведения дисперсных грунтов с учетом дискретности их строения являются решения механики зернистых сред [4]. Исходя из характерного размера частиц, может быть построена расчетная схема, позволяющая рассмотреть равновесие отдельных частиц с учетом их взаимного расположения. К сожалению, по мере увеличения количества частиц возрастает и количество уравнений в решении, а введение в схему частиц различного размера или отклонений от идеализированной упаковки приводит к стохастическому решению, результат которого в пределе совпадает с решениями механики сплошного тела.

Наиболее известной обобщающей теорией, связывающей параметры сопротивления сдвигу с физическими характеристиками, является теория критического состояния, в основе которой лежат работы Hvorslev и Roscoe [12]. Данная теория предполагает, что каждому значению среднего напряжения соответствует свое значение коэффициента пористости, который, в свою очередь, определяет величину сопротивления пластическому течению. Несмотря на активное развитие данной теории в зарубежных литературных источниках, в большинстве случаев с ее помощью невозможно описать упрочнение или разупрочнение, а также сдвиговое деформирование.

Чаще всего физические характеристики из задач механики грунтов полностью исключаются, и решение проводится для идеализированного сплошного тела, параметрами которого являются модули — параметры, связывающие между собой напряжения и деформации линейными либо нелинейными законами. Данные параметры определяются на основании лабораторных испытаний и сопоставления экспериментальных значений компонентов НДС. При этом выполнено значительное количество исследований, связывающих величины этих пара-

метров с физическими характеристиками, в частности плотностью, показателями консистенции, гранулометрического состава [2, 5]. Получаемые в данных исследованиях корреляции не позволяют описать причины зависимости, а только определяют ее количественно. Таким образом, можно констатировать, что большинство закономерностей механики грунтов носит феноменологический характер и не объясняет физической природы протекающих процессов

Альтернативным методом интерпретации результатов лабораторных испытаний может служить энергетический метод, широко применяемый в механике деформируемого твердого тела и, в особенности, в теории пластичности [10]. Изменение НДС некоторого тела в точке сопровождается преобразованиями энергии. С одной стороны, внешние силы, действующие на данное тело, совершают работу. С другой стороны, затраченная энергия частично запасается силами упругости, а частично расходуется на преодоление внутреннего трения и необратимые структурные изменения. Принимая во внимание, что в условиях лабораторного эксперимента систему можно рассматривать как замкнутую, энергетический подход может уверенно применяться в качестве дополнительного метода интерпретации результатов.

Пионерами в области применения энергетического метода были специалисты в области теории пластичности металлов. Гипотеза о постоянстве внутренней энергии при пластическом течении позволила сформулировать теорию прочности Mises. Большинство теорий пластического течения (в первую очередь, Прандтля — Рейсснера, Сен-Венана — Мизеса, Хилла) учитывают работу пластической деформации или ее мощность. Например, анализ работы деформаций позволяет описать упрочнение при пластическом течении на основании диаграммы Прандтля.

Применительно к механике грунтов этот подход был впервые адаптирован Drucker & Prager [10], предложившими закон неассоциированного течения и специализированное условие текучести. Также известны работы группы исследователей в области теории критического состояния [12], основные положения которой были получены из энергетических предпосылок. Группой исследователей рассматривался метод определения точки перехода к пластическому течению на основании затраченной работы [9]. В настоящее время энергетический подход применяется при исследовании свойств грунтов при динамическом нагружении, что позволяет оценивать степень поглощения энергии путем сопоставления работы упругой

деформации и энергии, рассеянной за один цикл нагружения (площади петли гистерезиса) [3]. На основании работы деформации предлагается оценивать так называемую «деформационную неустойчивость» — уровни деформаций, при которых происходят структурные изменения в дисперсных грунтах [1, 6]. Также энергетические методы применяются для определения истории нагружения (параметров переуплотнения), среди них наибольшее распространение получили методы Becker [7] и Wang & Frost [14].

Методика исследования

В настоящей работе предлагается методика интерпретации результатов испытаний осесимметричного трехосного сжатия с позиции энергии и работы деформаций. Этот метод испытаний выбран как, с одной стороны, достаточно широко распространенный, а с другой — позволяющий проводить измерения всех компонентов НДС в ходе опыта.

Стабилометрические испытания могут проводиться в различных режимах, определяющих как начальное состояние образца, так и условия дренирования в ходе опыта. Если не рассматривать неконсолидированный режим как узкоспециальный, то в начальный момент опыта фильтрационная консолидация в образце считается завершившейся (избыточное поровое давление отсутствует, плотность скелета постоянна и может быть однозначно определена). В случае полного водонасыщения в недренированном режиме при нагружении объем порового пространства остается постоянным вследствие несжимаемости жидкости. Это означает, что в скелете грунта будут развиваться исключительно деформации сдвига, а приращение среднего напряжения будет вместо объемных деформаций вызывать рост давления в поровой жидкости. Изменение порового давления также будет вызвано дополнительным изменением объема порового пространства при сдвиге — давление будет падать в дилатирующих грунтах и расти в контрактирующих. Следовательно, в ходе недренированных испытаний энергия будет расходоваться на упругие деформации сдвига, пластические деформации сдвига и изменение порового давления.

В дренированном режиме поровое пространство в ходе опыта открыто, следовательно, поровое давление не изменяется, а увеличение среднего напряжения p будет вызывать объемную деформацию. Так обычно происходит при применении стандартной траектории девиаторного раздавливания (СТС), представленной на рис. 1а, где увеличение

максимального главного напряжения вызывает также приращение среднего напряжения. Процессы дилатансии и контракции протекают свободно. Энергия расходуется на упругие и пластические сдвиговые и объемные деформации, причем пластическая составляющая объемной деформации складывается из действия среднего напряжения и дилатансии/контракции.

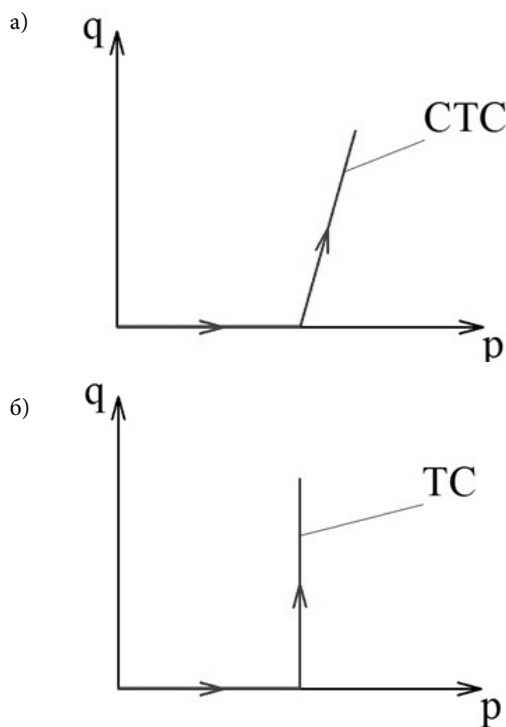


Рис. 1. Траектории девиаторного раздавливания СТС (а) и нагружения с постоянным средним напряжением ТС (б). Обозначения: p — среднее напряжение; q — девиатор напряжений

Реализация траектории нагружения с постоянным средним напряжением (ТС), приведенной на рис. 1б, приводит к тому, что любая объемная деформация в опыте происходит исключительно вследствие дилатансии/контракции. Энергия расходуется на упругие и пластические сдвиговые деформации, а деформации объема исключительно пластические и вызваны дилатансией/контракцией. Таким образом, при наличии серии опытов в различных режимах, с различными траекториями нагружения и при различных средних напряжениях можно разделить параллельно протекающие процессы и сопоставить между собой затрачиваемую на них работу (табл. 1).

Общую работу, совершенную над образцом, можно определить через вертикальное усилие F и перемещение штока Δh (1). Полученное значение следует отнести к объему образца, чтобы перейти к удельной работе деформации.

Таблица 1. Затраты энергии в ходе испытания трехосного сжатия и их проявления в различных режимах

Вид деформации	Консолидированно-недренированный (КН)	Консолидированно-дренированный (КД) Траектория СТС	Консолидированно-дренированный (КД) Траектория ТС
Упругие деформации объема	+	+	-
Пластические деформации объема — уплотнение	-	+	-
Пластические деформации объема — дилатансия/контракция	-	+	+
Упругие деформации сдвига	+	+	+
Пластические деформации сдвига	+	+	+
Изменение давления в поровой жидкости	+	-	-

$$\Delta W_{tot} = \Delta F \cdot \Delta h \quad (1)$$

Графически данная работа может быть определена как площадь под графиком зависимости напряжений от деформаций. Эта работа расходуется на деформирование образца, для деформации может быть определено приращение работы на единицу объема образца (удельная работа). Ее величину ΔW можно рассчитать для каждого вида деформации и напряжения по известной формуле (2):

$$\Delta W = \frac{\Delta \sigma \cdot \Delta \varepsilon}{2} \quad (2)$$

Исходя из предпосылок общей механики твердого тела (упругая деформация прямо пропорциональна напряжению, пластическое тече-

ние происходит при постоянном напряжении, при пластическом течении приращение объемной деформации равно нулю) на графике могут быть выделены участки, соответствующие различным фазам опыта. Если в ходе испытания выделить эти участки, то становится возможным определение энергетических параметров, связывающих напряжение и деформацию. Совместный анализ испытаний, выполненных в различных режимах и с различными траекториями нагружения позволяет получить значения энергетических параметров для каждого вида деформации.

Важно также фиксировать уровень деформаций, при которых переходит условный переход от одного режима деформирования к другому, так как данные пороговые значения деформаций используются при последующем моделировании.

Экспериментальные исследования

В качестве экспериментальной базы в настоящей работе рассматриваются результаты испытаний трехосным сжатием модельных грунтов (дресвы кварца фракции 2–5 мм), выполненные в стабилометре с диаметром образцов 300 мм, изготовленном ООО «НПП «Геотек» для НИУ МГСУ. Испытания выполнялись при среднем напряжении 200, 400 и 800 кПа в кинематическом режиме с постоянной скоростью деформации. В результате были получены зависимости вертикальной деформации от девиатора напряжений, а также объемной деформации от вертикальной, с учетом всех необходимых поправок, обусловленных конструкцией прибора. Полученный набор данных позволяет построить любые зависимости для прочих компонентов НДС.

Наиболее просто анализ выполняется для испытаний по траектории ТС. Если выделить последний участок, соответствующий постоянному наклону графика зависимости $W(\gamma)$,

то можно считать, что на данном участке развивается исключительно пластическое деформирование (рис. 2). При этом развиваются как деформации сдвига, так и деформации объема за счет дилатансии. Учитывая, что затраты энергии в данном случае вызваны исключительно преодолением трения, то коэффициент уравнений линейной аппроксимации может рассматриваться как функция внутреннего трения, что подтверждается линейной зависимостью этого коэффициента от давления в камере. Данный коэффициент по смыслу соответствует пластическому коэффициенту λ , связывающему между собой приращение работы пластической деформации и интенсивность касательных напряжений в теории пластического течения (3):

$$d\lambda = \frac{dA_p}{2\tau^2} \quad (3)$$

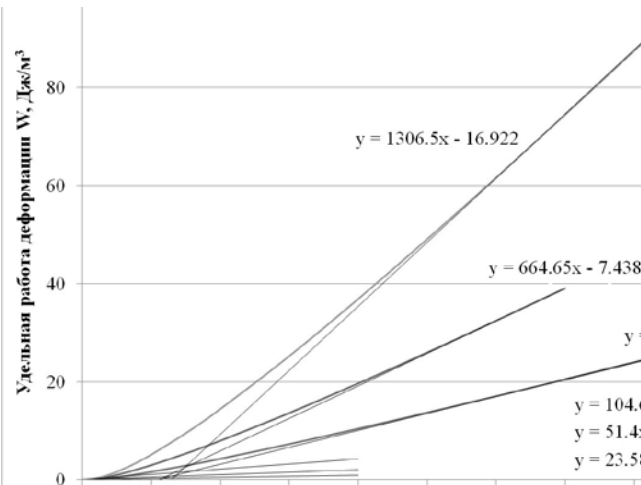


Рис. 2. Зависимости удельной работы деформации от относительной деформации сдвига для испытаний при давлении в камере 200, 400 и 800 кПа с корреляционными уравнениями начальных и конечных линейных участков

Примечательно, что эти линии пересекают ось ординат практически в одной и той же точке, соответствующей деформации сдвига $\gamma = 0.0108\text{--}0.0129$. Такая деформация сдвига соответствует осевой деформации $\epsilon = 0.007$, что в абсолютных величинах составляет 4.2 мм — приблизительно средний размер частицы в исследуемых образцах.

Для испытаний, выполненных при различных средних напряжениях, данные коэффициенты получаются различными, так как сопротивление пластическому течению определяется в основном внутренним трением. Если нанести полученные значения $d\lambda$ на график в зависимости от среднего напряжения, то эти значения хорошо аппроксимируются линейной функцией (4), отражающей зависимость сопротивления пластическому течению от среднего напряжения:

$$d\lambda(p) = 1.6p + 25 \quad (4)$$

Пороговая деформация сдвига, при которой происходит переход к пластическому течению, составляет $\gamma = 0.03\text{--}0.05$ для всех испытаний.

Если соотнести полученную скорость изменения работы относительно деформации сдвига и работу, совершенную нагрузочным устройством, то можно выявить расхождение — например, для образца, испытанного при давлении в камере 800 кПа, работа деформаций сдвига составляет 77.1% от общей работы нагрузочного устройства. Оставшиеся 22.9% энергии затрачены на трение в элементах прибора, деформирование упругой оболочки и — в основном — на работу по пластическому деформированию объема. Это наблюдение дает основание рассматривать зависимость объемной

деформации от девиатора напряжений и аналогичным образом получить величину энергии, затраченной на пластическое деформирование объема. Учитывая, что испытания проводились в кинематическом режиме, то полученное процентное отношение напрямую позволяет определить угол дилатансии (5):

$$\psi = \arcsin \frac{22.9}{77.1} = 17.3^\circ \quad (5)$$

С другой стороны, построение аппроксимирующих линий из начала координат позволяет получить энергию, расходуемую на упругое деформирование. Их наклон также пропорционален давлению в камере, при этом аппроксимируются эти точки уже степенной функцией. Это хорошо соотносится со степенным законом зависимости жесткости от напряжения, неоднократно описанным для различных условий [8, 11, 13].

В испытании по траектории девиаторного раздавливания (СТС) эти процессы будут накладываться друг на друга, при этом перестанут быть линейными, так как в ходе опыта среднее напряжение возрастает (а значит идет повышение жесткости и сопротивления сдвигу). Это означает, что и упругое, и пластическое деформирование с ростом напряжений будут требовать большей энергии. Но, учитывая, что испытания проводятся на одном и том же материале, полученные ранее зависимости будут частично справедливы.

Результаты и их обсуждение

На основании анализа результатов испытания трехосного сжатия с постоянным средним напряжением были определены следующие закономерности: удельная работа упругого сдвигового деформирования (6):

$$W_e^s = 0.0803p^{1.075} \quad (6)$$

удельная работа пластической деформации сдвига (7):

$$W_p^s = 1.6p + 25 \quad (7)$$

удельная работа пластической деформации объема (8):

$$W_p^v = 0.297W_p^s \quad (8)$$

Принимая во внимание, что по точкам окончания участков линейной аппроксимации могут быть определены величины пороговых деформаций, с помощью данных параметров можно воспроизве-

сти форму исходной экспериментальной кривой — смоделировать ее. Метод моделирования достаточно прост — для определенного шага деформаций сдвига (например, 0.1%) рассчитывается величина девиатора напряжений на основании (2). При этом удельная работа деформации вычисляется по (6–8), в зависимости от среднего напряжения. При достижении пороговых значений деформации происходит включение или отключение отдельных составляемых. Полученные в результате моделирования зависимости представлены на рис. 3.

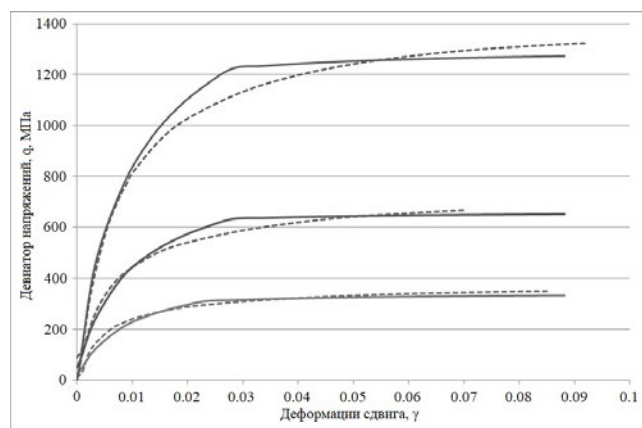


Рис. 3. Результат моделирования экспериментальных кривых.

Пунктиром показаны экспериментальные данные, сплошной линией — моделирование

Из результатов моделирования следует, что предложенный подход позволяет с высокой точностью воспроизводить экспериментальные зависимости. Результат моделирования складывается из отдельных достаточно простых математических закономерностей (формулы 6–8), каждая из которых действует в соответствующем диапазоне деформаций: до уровня 0.007 исключительно упругая, далее упругая и пластическая, после 0.03 — пластическая. При этом часть затрачиваемой энергии расходуется на объемную пластическую деформацию.

Необходимо отметить, что в предлагаемой модели отсутствует в классическом виде условие прочности как таковое — при переходе к пластическому течению вся работа, совершаемая установкой, расходуется на деформирование образца без увеличения девиаторного напряжения. Заметно, что происходит незначительное увеличение предела текучести за счет упрочнения вследствие развития

дилатансии.

Наибольшее расхождение наблюдается на участке перехода от упруго-пластического деформирования к пластическому течению. Вероятно, это связано с плавным развитием дилатансии в реальном образце, что может быть учтено при более детальной обработке результатов испытаний.

На основании совместного анализа испытаний по двум различным траекториям, возможно разделить описать все протекающие процессы деформирования. Такой метод обработки после соответствующей верификации может позволить разработать математические модели поведения, которые будут в качестве параметров использовать не различные механические модули, а энергетические параметры, в свою очередь определяемые внутренним трением и прочностью контактов. Для выраженных пластических сред, которыми являются дисперсные грунты, это в большей степени отражает их структурные особенности, чем гипотезы механики сплошной среды.

Заключение

Предложенный в настоящей работе метод интерпретации результатов и моделирования механического поведения обладает рядом преимуществ по отношению к механике сплошного тела.

- теории напряжений и деформаций используются отдельно, связь между ними устанавливается с помощью энергетических параметров, отражающих физический смысл протекающих при деформировании процессов;

- получаемые параметры являются скалярными величинами, и представляются в виде простых функций среднего напряжения;

- пороговые величины деформаций могут быть определены экспериментально и соотнесены с гранулометрическим составом образцов.

- предлагаемый метод анализа результатов испытаний трехосного сжатия может применяться и к другим видам лабораторных испытаний (простой сдвиг, компрессионное сжатие), при условии постоянства НДС в ходе опыта.

Разработку данного метода и его верификацию предполагается выполнить в ходе дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вознесенский Е. А. Пороговые деформации в грунтах // Геотехника. 2018. № 5–6 (10). С. 6–16.
2. Гольдин А. Л., Рассказов Л. Н. Проектирование грунтовых плотин / А. Л. Гольдин, Л. Н. Рассказов, Москва: АСВ, 2001. 375 с.
3. Ишихара К. Поведение грунтов при землетря-

- сениях / К. Ишихара, НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект»-е изд., СПб., 2006. 383 с.
4. Кандауров И. И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве / И. И. Кандауров, Ленинград: Стройиздат, 1966. 320 с.
 5. Крыжановский А. Л., Мендоса Т. Д. А., Укибаев Е. Сопротивление сдвигу смеси сыпучих грунтов // Инженерная геология. 1985. № 2.
 6. Усов А. Н., Вознесенский Е. А. Деформационная неустойчивость в глинистых грунтах. Возникновение и идентификация // Инженерная геология. 2016. № 2. С. 14–21.
 7. Becker D. E. [и др.]. Work as a criterion for determining in- situ and yield stresses in clays // Canadian Geotechnical Journal. 1987. (24). С. 549–564.
 8. Benz T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences 2007.
 9. Crooks J. H. A., Graham J. Geotechnical properties of the Belfast estuarine deposits // Geotechnique. 1976. № 2 (26). С. 293–315.
 10. Drucker D. C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Journal of applied Mathematics. 1952. № 10. С. 157–165.
 11. Janbu N. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests Wiesbaden:, 1963.С. 19–25.
 12. Roscoe K. H., Schofield A. N., Wroth C. P. On the yielding of soils // Geotechnique. 1958. № 8. С. 22–53.
 13. Schanz T., Vermeer P. A., Bonnier P. G. The hardening soil model: formulation and verification Rotterdam: Balkema, 1999.С. 1–16.
 14. Wang L. B., Frost J. D. Dissipated Strain Energy Method for Determining Preconsolidation Pressure // Canadian Geotechnical Journal. 2004. № 4 (41). С. 760–768.