

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ КОНТРОЛЯ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ГРУНТОВ

METHODIC ISSUES OF PORE PRESSURE CONTROL IN LABORATORY SOIL TESTING

ВОЗНЕСЕНСКИЙ Е.А.

Профессор геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, д.г.-м.-н., arnoldych@gmail.com

VOZNESENSKY E.A.

Professor, DSc, Faculty of Geology, M.V. Lomonosov Moscow State University, arnoldych@gmail.com

Ключевые слова:

поровое давление; трехосное сжатие; водонасыщенные грунты; неводонасыщенные грунты; эффективные напряжения; сжимаемость воды; локальные измерения.

Key words:

pore pressure; triaxial test; saturated soils; unsaturated soils; effective stress; water compressibility; local measurements.

Аннотация

Рассматриваются вопросы надежности измерения порового давления при лабораторных, главным образом трехосных, испытаниях грунтов. Показано, что контроль порового давления при таких испытаниях осложняется двумя проблемами — неполным водонасыщением образцов, фильтров и системы измерения порового давления, а также конечной сжимаемостью поровой воды, что обуславливает запаздывание измеряемых значений порового давления на торце образца по сравнению с реально возникающим в центральной части. Обсуждаются возможные варианты решения этих проблем.

Введение

Накопленный опыт исследований заставляет обратить внимание на некоторые методические сложности, которые возникают при экспериментальном измерении порового давления. И, самое главное, эти сложности приводят к явным ошибкам в определении прочностных и деформационных свойств грунтов. В статье рассматриваются некоторые соображения по поводу измерения порового давления в лабораторных — главным образом трехосных — испытаниях грунтов.

Одним из «краеугольных камней» современной механики грунтов является принцип эффективных напряжений, который К. Терцаги начал разрабатывать в 1920-х годах и сформулировал в современном виде на 1-й Конференции по механике грунтов и фундаментостроению в 1936 году. Суть его заключается в том, что изменения объема и прочность грунтов контролируются эффективными напряжениями (σ'), величина которых в водонасыщенном состоянии равна разнице между полными (σ) и нейтральными (u) напряжениями:

$$\sigma' = \sigma - u. \quad (1)$$

Это положение сыграло действительно огромную роль в развитии представлений о закономерностях поведения грунтов при механических нагрузках, и в 1988 году Р. Пек, выступая в Бостоне, отметил принцип эффективных напряжений среди четырех основных научных достижений, которыми, по его мнению, К. Терцаги обогатил механику грунтов [6].

Последующие теоретические и экспериментальные работы, прежде всего исследования А. Скемптона [10], показали, что это простое выражение, хотя и не является абсолютно строгим, дает превосходную аппроксимацию почти во всех практических случаях работы водонасыщенных грунтов под действующими нагрузками.

Анализируя выражение (1), необходимо заметить, что величина собственно эффективного напряжения никак не может быть измерена напрямую, а «точно» нам в нем известно только задаваемое в опыте полное напряжение с учетом допущения о равномерном рас-

Abstract

Reliability of pore pressure measurements in laboratory (mostly triaxial) testing is discussed. It is demonstrated that pore pressure control in laboratory testing is complicated by two problems: uncomplete saturation of samples, porous stones and the system of pore pressure measurements and by finite pore water compressibility causing late measurements of the pore pressures at the ends of a sample compared to the real ones in the central part. Possible solutions of these difficulties are discussed.



пределении напряжений в поперечном сечении условно «сплошного» материала. При этом игнорируется реальное распределение истинных контактных напряжений между частицами грунта, поскольку их все равно невозможно контролировать. Но это по крайней мере величина задаваемая или непосредственно измеряемая. Но, поскольку все рассуждения об изменении объема грунта и его прочности строятся на эффективном напряжении, встает закономерный вопрос о надежности измерения второго члена уравнения (1) — порового, или нейтрального, давления.

Неводонасыщенные грунты

Начнем с неводонасыщенных грунтов. Практика определения свойств таких систем в российских инженерных изысканиях, да и в научных исследованиях, практически отсутствует. И ГОСТ 12248-2010 [2] фактически заставляет экспериментатора сначала привести грунт в водонасыщенное состояние, а только затем исследовать и испытывать его именно как водонасыщенную систему, поскольку это упрощает измерение порового давления, и контроль изменения объема грунта проводится обычно по объему отжатой жидкости на стадии предварительной консолидации при недренажном или дренажном нагружении.

Однако в реальности в любом массиве в общем случае присутствует несколько разных по степени увлажнения зон. В верхней части разреза может присутствовать практически сухой грунт при степени влажности $S_r \rightarrow 0$. Ниже идет зона неполного водонасыщения, и при степени влажности 0,2–0,8 грунт представляет собой трехфазную систему с непрерывной и жидкой, и газовой фазой. И только в зоне капиллярной каймы степень влажности составляет более 0,8, приближаясь к единице, а газовая фаза становится разобщенной — появляются пузырьки газа в жидкости, защемленные газы, непрерывной становится только жидкая фаза. При этом газовые «включения», разумеется, влияют на ее сжимаемость.

Любая такая неполностью водонасыщенная система обладает потенциалом влаги, т.е. способностью поглощать влагу извне и удерживать ее в силу возможности существования разных категорий влаги. В результате появляется дополнительный компонент напряжений, отличающийся от просто порового давления: появляется капиллярно-осмотическое всасывание ψ :

$$\psi = (u_a - u_w) + \Pi, \quad (2)$$

где u_a — давление в газовой фазе; u_w — давление в жидкой фазе; Π — осмотическое давление.

А поскольку осмотический компонент Π имеет некоторое значение лишь для высокодисперсных глин с высокой физико-химической активностью, то в механике неводонасыщенных грунтов основное значение имеет собственно капиллярное всасывание ($u_a - u_w$), равное разнице между давлением в газовой и водной фазах соответственно. И тогда принцип эффективных напряжений может быть записан следующим образом [5]:

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w), \quad (3)$$

где первый член уравнения называется «чистым полным напряжением», а коэффициент $\chi = a_w/a$ при всасывающем давлении представляет собой долю общей поверхности твердых частиц, контактирующую с жидкой фазой, т.е. имеет очевидный физический смысл, но не определяем экспериментально. А следовательно, и все выражение (3) становится очень трудно использовать практически. В связи с этим, когда в 1970-х годах начала активно развиваться механика неводонасыщенных грунтов, был предложен [8, 9] альтернативный подход, предполагавший описание объемных деформаций и сдвиговой прочности грунта функцией двух переменных — чистого полного напряжения и всасывающего давления.

Тогда тензор напряжений можно представить в виде суммы двух матриц:

$$\begin{bmatrix} (\sigma_x - u_a) & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - u_a) & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & (\sigma_z - u_a) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (u_a - u_w) & 0 & 0 \\ 0 & (u_a - u_w) & 0 \\ 0 & 0 & (u_a - u_w) \end{bmatrix},$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ — соответственно нормальные и тангенциальные компоненты тензора в выбранной системе координат, а, например, сдвиговую прочность грунта τ выразить следующим образом:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \cdot tg\phi' + (u_a - u_w) \cdot tg\phi^b, \quad (4)$$

где c' и ϕ' — соответственно значения сцепления и угла внутреннего трения в эффективных напряжениях; ϕ^b — изменение угла внутреннего трения за счет всасывания.

Аналогичным образом можно анализировать и изменение объема неводонасыщенных грунтов.

При проведении испытаний неводонасыщенных грунтов есть несколько важных методических моментов. Во-первых, нужна характеристическая кривая грунта, отражающая зависимость влажности (объемной влажности, степени влажности) от всасывающего давления (рис. 1). На этой кривой есть две важные характерные для каждого грунта точки:

- давление входа воздуха — давление появления первого воздушного пузыря, меняющего степень водонасыщения системы;
- остаточная влажность, удаление которой практически невозможно даже при очень больших разрежениях (всасывающих давлениях).

Для построения характеристической кривой необходимо провести измерения всасывающего давления при разных влажностях тензиометром.

Во-вторых, в опыте нужно каким-то образом контролировать всасывающее давление при данной степени водонасыщения грунта. Для этого используется заданное соотношение давления воздуха и воды, подаваемой в систему либо через полимерную мембрану, либо через пористый керамический фильтр с известным давлением входа воздуха. Коммерчески сегодня доступны керамические фильтры с давлением входа воздуха до

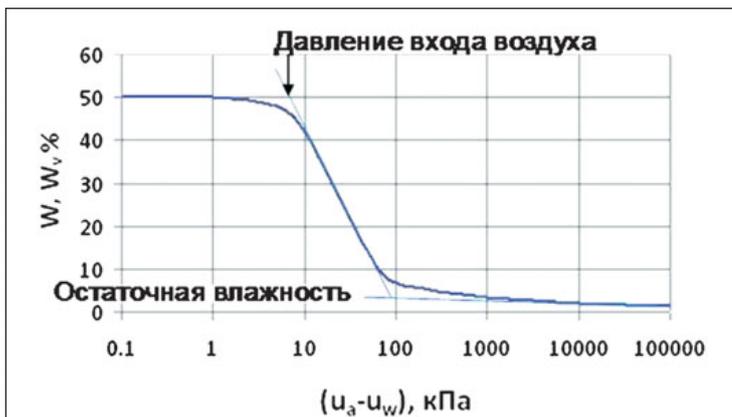


Рис. 1. Характеристическая кривая связного грунта. W — влажность; W_v — объемная влажность; $(u_a - u_w)$ — капиллярное всасывание, равное разнице между давлением в газовой и водной фазах соответственно

1,5 МПа, что позволяет контролировать разницу между давлениями воздуха и жидкости во всем практически значимом диапазоне всасывающих давлений. Технически в условиях трехосного сжатия это осуществляется раздельной подачей воздуха в образец с заданным давлением через верхний штамп, а воды — также с заданным давлением — через пьедестал, в который вместо обычного пористого камня вмонтирован фильтр с известным давлением входа воздуха (рис. 2).

В-третьих, эта процедура требует времени для достижения равновесия между давлениями в жидкой и газовой фазах во всей системе, что является отдельным методическим вопросом изучения неводонасыщенных грунтов.

«Водонасыщенные» грунты

Теперь обратимся к методике испытаний «водонасыщенных» грунтов, являющейся, как уже отмечалось, практической основой определения физико-механических характеристик в России. Начнем с того, что следует понимать под водонасыщенным грунтом. В соответствии с ГОСТ 25100-2011 [3] (табл. Б.11) таковым



Рис. 2. Пьедестал камеры трехосного сжатия с вмонтированным керамическим фильтром для обеспечения заданного давления входа воздуха (high air entry porous stone)

следует считать грунт с величиной степени влажности S_r более 0,8. Очевидно, что такой грунт не является полностью водонасыщенным с точки зрения возможности измерения порового давления без использования описанных выше методических приемов, и его контроль стандартным образом может быть невозможным даже при степени влажности, равной единице. Дело в том, что эта величина расчетная, а не определяемая напрямую. Расчет выполняется на основе экспериментально определяемых значений влажности и плотности грунта, а также плотности его твердых частиц. Каждое из этих определений имеет определенную погрешность, и, рассчитывая впоследствии степень влажности S_r вблизи точки водонасыщения, можно получить значения как 0,9, так и 1,2, хотя последнее и представляется физически бессмысленным.

На самом же деле «водонасыщенными» с точки зрения методики их испытаний мы считаем грунты, залегающие в разрезе ниже уровня подземных вод. Исходя из этого для лабораторных испытаний образцы несвязных грунтов либо создаются сразу водонасыщенными (например, методом осадения в воду минуя воздушную среду), либо насыщаются после их формирования с заданной пористостью (например, методом сухой послойной отсыпки или послойного влажного трамбования). При этом используется деаэрированная вода и часто предварительное насыщение грунта углекислым газом [1, 4], который вытесняет из пор воздух, а сам гораздо лучше растворяется в воде.

Образцы связных грунтов обжимаются до природных напряжений (которые, вообще говоря, априори неизвестны, и лишь предполагается, что мы можем их рассчитать) по методу восстановления фазового состава (ВФС) [2] или другим образом до заданного уровня. Далее необходимо проконтролировать степень водонасыщения, поскольку это ключевой критерий корректности последующего измерения порового давления.

Наиболее общепринятый показатель отсутствия воздуха в системе измерения порового давления (в которую входит и образец грунта) при испытаниях в условиях трехосного сжатия — параметр порового давления Скемптона:

$$B = \Delta u / \Delta \sigma_m, \quad (5)$$

где $\Delta \sigma_m$ — изменение среднего нормального напряжения, соответствующее изменению полного гидростатического давления в камере; Δu — изменение порового давления.

Определяется этот показатель путем измерения порового давления при увеличении всестороннего напряжения ступенями (на 20–50 кПа) при закрытом дренаже. В идеале хочется получить $B = 1,00$, но практически этого почти никогда не бывает (только случайно, что может быть и результатом неполной стабилизации давлений на предыдущей ступени), поэтому за критерий водонасыщения принимается условие $B \geq 0,95$ (рис. 3).

Но этот параметр недостаточно надежен для контроля водонасыщения плотных песков и связных (особенно переуплотненных) грунтов. Ведь реально при контроле B происходит следующее: мембрана под внешним давлением немного вдавливается в поры грунта, что при его достаточно «подвижном» скелете обеспечивает пе-



редачу большей части внешнего давления на поровую жидкость. Если же — как в случае с плотными песками или переуплотненными глинами — скелет оказывается достаточно «жестким», то возможности простого обжатия для обеспечения полного водонасыщения невелики. Что же делать, если не удастся достичь требуемого уровня параметра порового давления?

Основные причины неполного водонасыщения образцов: присутствие заземленных газов в порах; потери влаги из периферических пор при подготовке (вырезании) образца; частичное осушение торцевых фильтров за счет всасывания влаги образцом при его установке. Стандартный подход к повышению степени водонасыщения образца при $B < 0,95$ — создание противодействия путем искусственного повышения давления жидкости в системе измерения порового давления с одновременным и эквивалентным повышением всестороннего сжимающего напряжения, что позволяет сохранить прежний уровень эффективных напряжений. Этот метод достаточно успешно работает для песков, особенно для сформированных способом влажного трамбования с последующим водонасыщением.

Однако такой метод, по мнению автора, нецелесообразно использовать для связных грунтов по двум причинам. Во-первых, процесс выравнивания порового давления на каждой ступени изменения u и σ_m может быть весьма длительным по сравнению с песчаными образцами. Во-вторых, создание противодействия означает и изменение влажности с сопутствующим изменением свойств грунта, что гораздо существеннее для связных грунтов по сравнению с несвязными.

Еще один возможный методический прием — увеличение давления в камере выше 400 кПа (если позволяют условия испытания), что приводит к растворению азота в воде и повышению B .

Итак, первая проблема контроля порового давления при испытаниях «водонасыщенных» грунтов заключается все же в неполном водонасыщении образца, пористых фильтров и дрен в системе измерения порового давления, а также в присутствии остаточных газов в воде, заполняющей эту систему, и в поровом растворе. Можно предложить следующие варианты решения этой проблемы:

- принудительное насыщение образца противодействием (что не всегда возможно и обоснованно) или повышением сжимающих напряжений, а также разумной комбинацией этих способов;
- анализ результатов испытаний в полных, а не в эффективных напряжениях (например, в рамках энергетического подхода (например, [11]));
- анализ результатов испытаний в эффективных напряжениях, но исключительно на основе данных «дренированных» испытаний — для получения результатов без необходимости точного контроля порового давления;
- переход к методикам испытаний неводонасыщенных образцов, рассмотренных ранее в данной статье.

Вторая проблема надежного измерения порового давления заключается в сжимаемости воды. Проводя испытания и последующие расчеты, мы считаем воду несжимаемым флюидом, но на самом деле она сжимаема и среднее значение ее изотермического модуля упругости E_{sc} составляет 2 020 МПа. А коль скоро

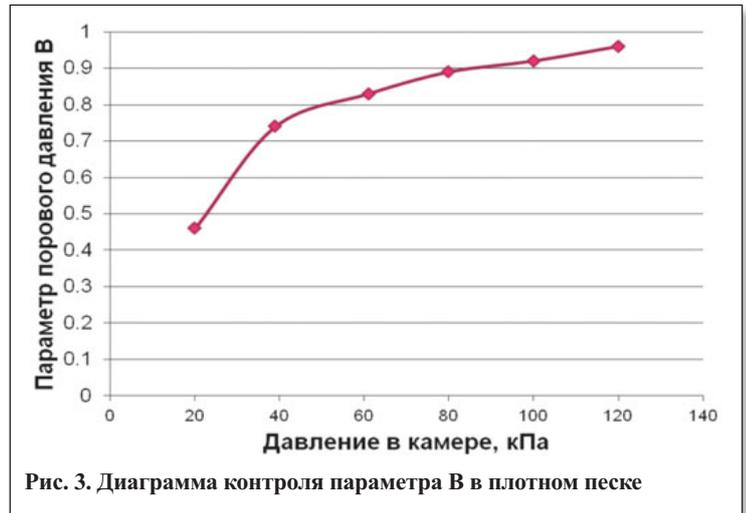


Рис. 3. Диаграмма контроля параметра B в плотном песке

флюид обладает хотя и очень малой, но конечной сжимаемостью, то выравнивание порового давления в разных частях образца происходит исключительно за счет миграции эквивалентных количеств жидкости из точки с более высоким поровым давлением (u_1) в другую с более низким (u_2).

Рассмотрим испытание грунта в условиях трехосного сжатия. В соответствии с принципом Сен-Венана касательные напряжения в центральной части образца будут выше, чем вблизи торцов, а следовательно, и поровое давление там будет больше (или меньше, если грунт проявляет дилатантные свойства). Но обычно поровое давление измеряется внешними датчиками по торцу или торцам образца. Для изменения порового давления на торцах до уровня возникшего избыточного порового давления, т.е. для выравнивания давления жидкости во всем объеме образца, вода должна физически мигрировать из центральной части к торцам и вызвать соответ-

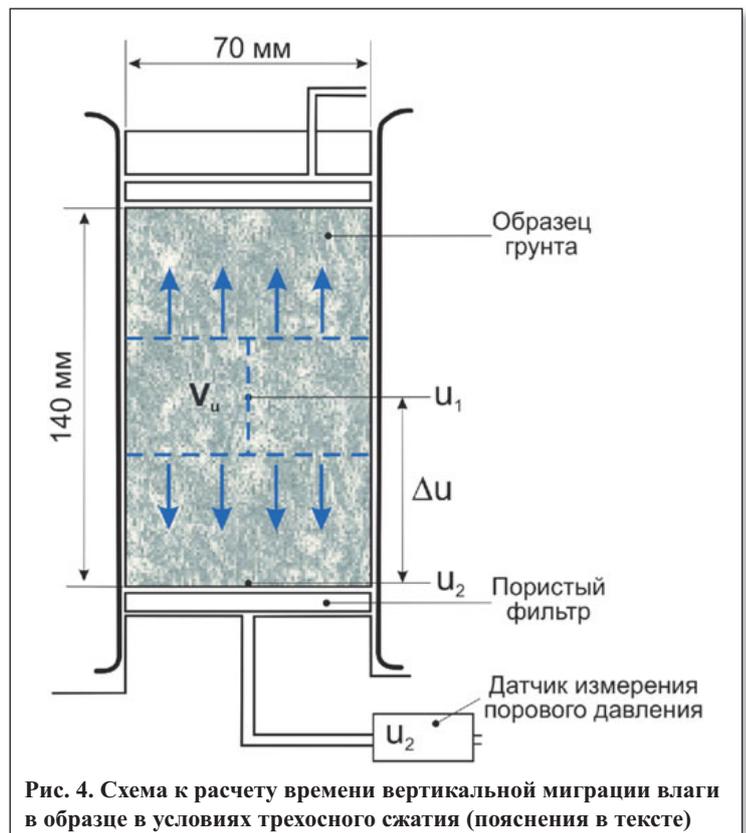


Рис. 4. Схема к расчету времени вертикальной миграции влаги в образце в условиях трехосного сжатия (пояснения в тексте)

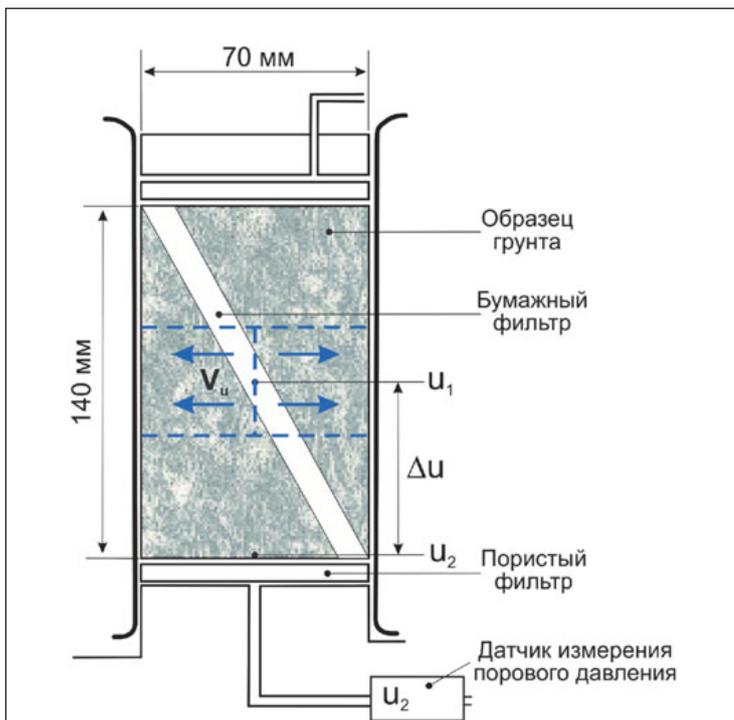


Рис. 5. Схема к расчету времени радиальной миграции влаги в образце в условиях трехосного сжатия (пояснения в тексте)

ствующее изменение давления в жидкости во внешней системе измерения. Поэтому вызывает большой методический интерес время «запаздывания» в измерении порового давления относительно его возникновения в зоне максимальных касательных напряжений.

Автор попытался провести ориентировочный расчет этого времени. Для этого он рассмотрел два образца стандартного размера, использующиеся при трехосных испытаниях — диаметром 50 и 70 мм и высотой 100 и 140 мм соответственно, предположив, что скачок порового давления приурочен к центральной трети вертикального сечения образца (рис. 4).

Зная пористость этой центральной трети объема, можно рассчитать объем жидкости в нем V_u , а зная сжимаемость жидкости — расход возникающего потока. Предположив, что вода мигрирует равномерно по площади поперечного сечения образца к его торцам, и задавшись какой-то реально возможной величиной перепада порового давления, можно посчитать, сколько это займет времени. Приняв для простоты, что миграция влаги будет подчиняться формуле Дарси (что, конечно, в общем случае не так, и процесс диффузии влаги происходит медленнее), время запаздыва-

ния изменения порового давления на торцах образца (t) определится выражением:

$$t = \frac{Q}{2K_{\phi}IS} \quad (6)$$

где Q — расход потока; I — градиент напора (определяющегося перепадом порового давления на половине высоты образца); S — площадь поперечного сечения образца; K_{ϕ} — коэффициент фильтрации грунта.

Задавшись небольшим перепадом порового давления (всего 20 кПа) и рассмотрев миграцию влаги в реальных грунтах с известными пористостью и коэффициентом фильтрации, получили (табл. 1), что это время запаздывания в глинистых грунтах может составлять от 16 секунд до 9 минут! То есть в каждый момент времени в течение всего опыта с кинематическим нагружением измеряемое поровое давление не соответствует ни приложенному осевому давлению, ни измеренной осевой деформации.

А что же в песках? В песках с высокой проницаемостью, например в мелких, все происходит почти мгновенно — запаздывание составляет всего 0,2 мс. Но вот в пылеватом песке (нижняя строчка табл. 1) это время составляет уже 50 мс, а это продолжительность цикла динамического нагружения с частотой всего лишь 20 Гц. А значит, при проведении динамических испытаний на разжижаемость или виброползучесть даже песков с высокой частотой поровое давление, являющееся ключевым показателем в таком испытании, может измеряться попросту неправильно. И для быстротекущих процессов либо система измерения порового давления с внешним датчиком неадекватна, либо без достаточного обоснования для динамических испытаний грунтов нельзя применять высокие частоты нагружения. Это, кстати, и требование ГОСТ 56353-2015 [4].

Но возможна и другая конфигурация образца при трехосном сжатии — с использованием боковых дренажей в виде водонасыщенных бумажных фильтров непосредственно на боковой поверхности глинистых образцов, имеющих форму спирали или «китайского фонарика». Они, правда, используются не для повышения надежности измерения порового давления, а лишь для ускорения процесса предварительной консолидации образца. Но так или иначе они непосредственно связывают дренажной линией центральную и торцевые части образца, сокращая путь фильтрации и ускоряя миграцию влаги (рис. 5).

Рассмотрим миграцию влаги в радиальном направлении из цилиндрического объема радиусом, составляющим 1/3 радиуса образца в центральной трети его вертикального сечения. Примем неизвестную нам про-

Таблица 1

Оценка времени запаздывания измерения порового давления в условиях недренированного трехосного сжатия глинистых и песчаных грунтов при вертикальном потоке влаги

Вид грунта	Высота образца, мм	Диаметр образца, мм	Изменение порового давления Δu , кПа	Коэффициент пористости	Коэффициент фильтрации K_{ϕ} , см/с	Время запаздывания t , с
Суглинок	140	70	20	1,03	$1,16 \times 10^{-8}$	29,7
Суглинок	100	50	20	1,03	$1,16 \times 10^{-8}$	15,9
Глина	140	70	20	0,44	$2,27 \times 10^{-9}$	91,4
Глина	140	70	20	0,39	$3,52 \times 10^{-10}$	540,4
Песок мелкий	140	70	20	0,55	$1,27 \times 10^{-3}$	0,0002
Песок пылеватый	140	70	20	0,73	$5,79 \times 10^{-6}$	0,05



нищаемость бумажного фильтра бесконечно большой, т.е. влага одновременно достигает и бокового фильтра, и датчика на торце образца. Следовательно, длина пути фильтрации в любом вертикальном сечении образца равна 2/3 его радиуса, а площадь потока в некотором условном среднем поперечном сечении составит:

$$S = 0,7 \cdot 2\pi r h, \quad (7)$$

где r, h – радиус и высота центральной трети образца соответственно.

Результаты расчетов для тех же глинистых грунтов (для песков боковые дрены не используются) представлены в таблице 2. Они показывают, что время запаздывания при использовании боковых фильтров существенно сокращается, однако окончательно проблема для быстротекущих процессов не решается. Кроме того, как будет показано ниже, заложенные в расчеты допущения привели скорее к занижению реального времени миграции влаги в образце, чем к его завышению.

Что можно еще сделать для решения проблемы влияния сжимаемости воды на измеряемые значения порового давления? Современные средства испытаний грунтов позволяют использовать локальную схему измерения порового давления непосредственно в центральной части образца, что исключает эффект запаздывания при миграции влаги во всем объеме грунта. Для этого пористый мини-пробник внедряется в центральную часть образца через специальную манжету в мембране, а участок его проникновения затем должным образом изолируется от камеры прибора.

Эти пробники для мягких нормально уплотненных грунтов и для переуплотненных грунтов, проявляющих при сдвигообразовании дилатансию и капиллярное всасывание, представлены на рис. 6. В последнем случае пробник имеет наконечник из керамики с высоким давлением входа воздуха, например 500 кПа. Это означает, что он будет оставаться водонасыщенным и позволит правильно измерять поровое давление до капиллярного всасывания в 5 атм. Кроме того, в таких пробниках существует возможность их принудительного водонасыщения через тонкую стальную магистраль (видна на рис. 6). Вторая такая тонкая стальная магистраль соединяется с датчиком, также установленным вне камеры вместе с дополнительным блоком для отдельного водонасыщения системы измерения порового давления.

Это, конечно, увеличивает трудоемкость и временные затраты проведения эксперимента за счет установки такого датчика (рис. 7), однако резко повышает надежность и информативность получаемых результатов.

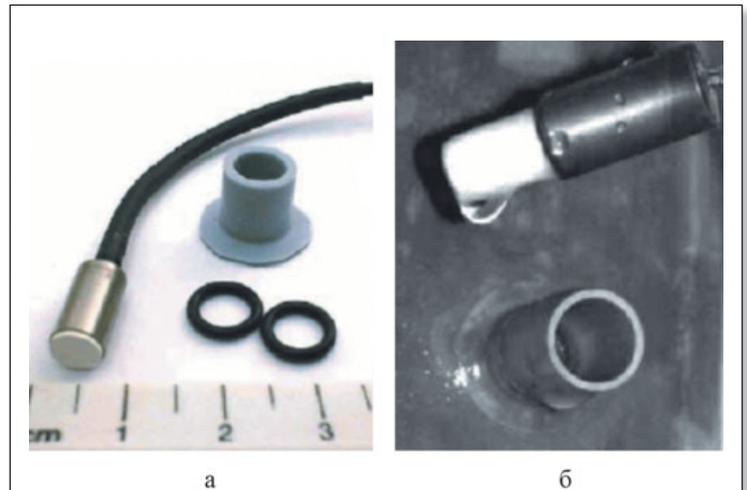


Рис. 6. Пробники для локального измерения порового давления в грунтах: а — для мягких нормально уплотненных грунтов; б — для переуплотненных грунтов с возможностью принудительного насыщения пробника (по [7])



Рис. 7. Образец глинистого грунта с установленными датчиками локального измерения порового давления и деформаций

Таблица 2

Оценка времени запаздывания измерения порового давления в условиях недренарованного трехосного сжатия глинистых грунтов при радиальном потоке влаги

Вид грунта	Высота образца, мм	Диаметр образца, мм	Изменение порового давления Δu , кПа	Коэффициент пористости	Коэффициент фильтрации K_f , см/с	Время запаздывания t , с
Суглинок	140	70	20	1,03	$1,16 \times 10^{-8}$	1,1
Суглинок	100	50	20	1,03	$1,16 \times 10^{-8}$	0,8
Глина	140	70	20	0,44	$2,27 \times 10^{-9}$	3,3
Глина	140	70	20	0,39	$3,52 \times 10^{-10}$	19,8

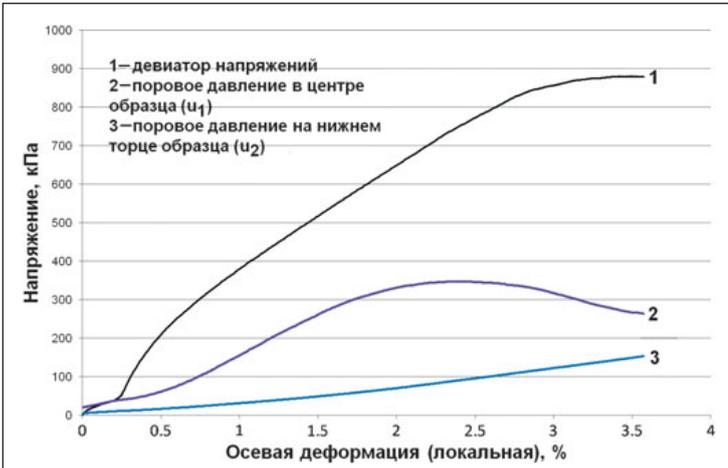


Рис. 8. Недренированное кинематическое трехоснее сжатие глины с боковыми дренами. Образец 100×200 мм, скорость деформации 5% в сутки

На рис. 8 представлены результаты испытаний плотной водонасыщенной глины, которые показывают, что при заданных условиях испытания (и очень медленном нагружении — всего 5% осевой деформации в сутки) разница между поровым давлением, измеренным на нижнем торце образца (u_2) и в центральной части (u_1), достигала 270 кПа, а на момент разрушения они различались вдвое! Кроме того, датчик порового давления на торце образца не позволил зафиксировать особенности его изменений (рост до деформации 2,3% и последующее падение при приближении к точке критического состояния).

Еще один пример, показывающий, что запаздывание выравнивания порового давления в объеме образца может иметь решающее значение для корректности интерпретации результатов, представлен на рис. 9. Это результаты 20 циклов динамического нагружения плотного водонасыщенного ($B = 0,96$) песка и наблюдений за образцом после его прекращения. Видно, что после остановки динамического воздействия ни деформация, ни нагрузка на образец не меняются, тогда как поровое давление продолжает нарастать еще целых 10 минут! То есть процессы капиллярного осмоса, направленные на выравнивание порового давления в

объеме образца, продолжают и существенно влияют на измеряемую величину нейтрального напряжения.

Таким образом, вторая важная проблема контроля порового давления при лабораторных испытаниях грунтов заключается в запаздывании измерений порового давления на торцах по сравнению с центральной частью образца, что является следствием конечной сжимаемости воды и особенно важно для быстротекущих процессов — точного определения эффективных напряжений в момент разрушения при кинематическом нагружении грунта, при динамических испытаниях. Можно предложить следующие пути решения этой проблемы:

- локальное измерение порового давления в центре образца — для глинистых грунтов;
- использование обильной смазки и полированных штампов на торцах укороченных образцов;
- обоснованное ограничение скорости или частоты нагружения образца при испытаниях.

О «дренированных» и «недренированных» испытаниях

Этот вопрос тесно связан с задачей контроля порового давления. Прежде всего очевидно, что в массиве грунтов не бывает полностью недренированных условий — всегда существует возможность частичной миграции влаги в зону с меньшим уровнем напряжений. Система открыта, и это лишь допущение, что влага не успевает мигрировать в процессе нагружения.

Но важнейшим условием недренированных испытаний является возможность контроля порового давления для анализа поведения грунта в эффективных напряжениях. Это обеспечивается физической невозможностью оттока влаги из системы при закрытом дренаже. С этой точки зрения «быстрый» одноплоскостной срез не является недренированным испытанием, поскольку система открыта, поровое давление не контролируется и частичная миграция влаги происходит. А вот недренированное трехоснее сжатие действительно является таковым: система закрыта. При этом ошибка условия равенства нулю объемных деформаций повышается с ростом напряжений и размеров образца из-за влияния конечной сжимаемости воды.

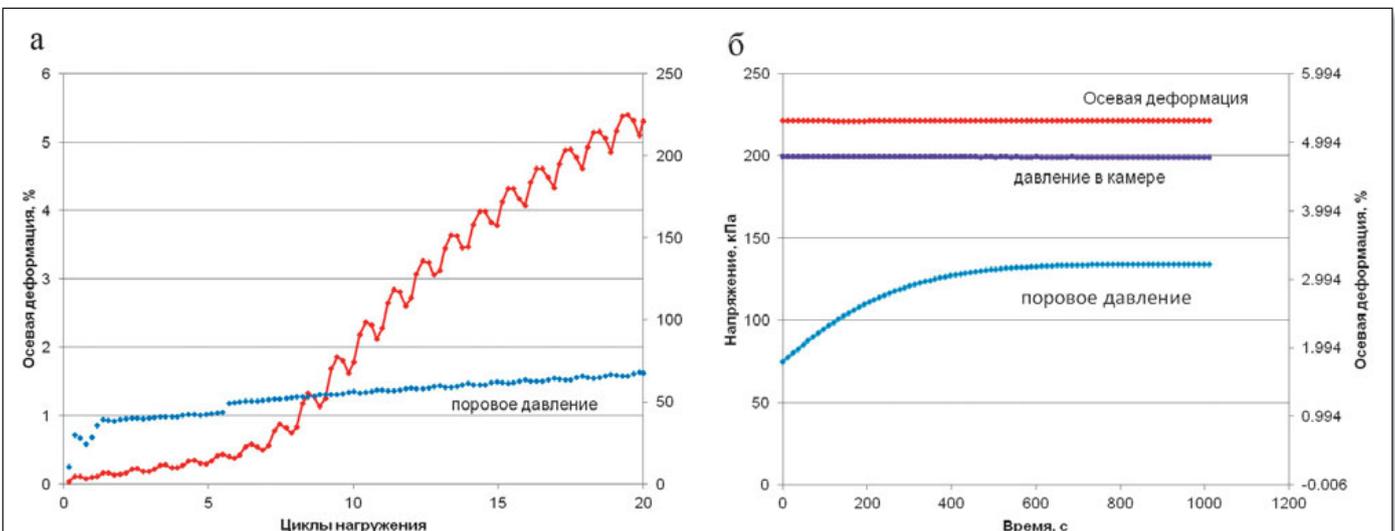


Рис. 9. Результаты динамических испытаний плотного песка с частотой 0,2 Гц при параметре порового давления Скемптона $B=0,96$: а — динамическое нагружение, б — после прекращения динамического воздействия



Теперь о дренированных трехосных испытаниях. Поскольку при измерении по торцу (торцам) образца система открыта в атмосферу (или контроллер), то поровое давление реально не контролируется и равенство нулю порового давления при сдвиге лишь полагается. А задаваемая скорость деформации образца при этом рассчитывается из длительности фильтрационной консолидации. Смысл этой операции заключается в расчете такой скорости деформации, при которой поровое давление будет успевать рассеиваться, т.е. будет равно нулю в течение всей стадии сдвига.

Подтверждением этому служат представленные на рис. 10 результаты наблюдений за предварительной консолидацией плотной глины в условиях трехосного сжатия. Очевидно, что поровое давление не только сохраняется и по завершении фильтрационной стадии консолидации, но вообще нигде не обращается в ноль, оставаясь на уровне 10–15 кПа уже далеко в ходе вторичной консолидации. И это означает, что мы занижаем показатели физико-механических свойств, определяемых при дренированных испытаниях, поскольку не имеем сведений о реально возникающем поровом давлении.

Заключение

В заключение в виде таблицы 3 в обобщенной форме охарактеризуем основные проблемы, осложняющие

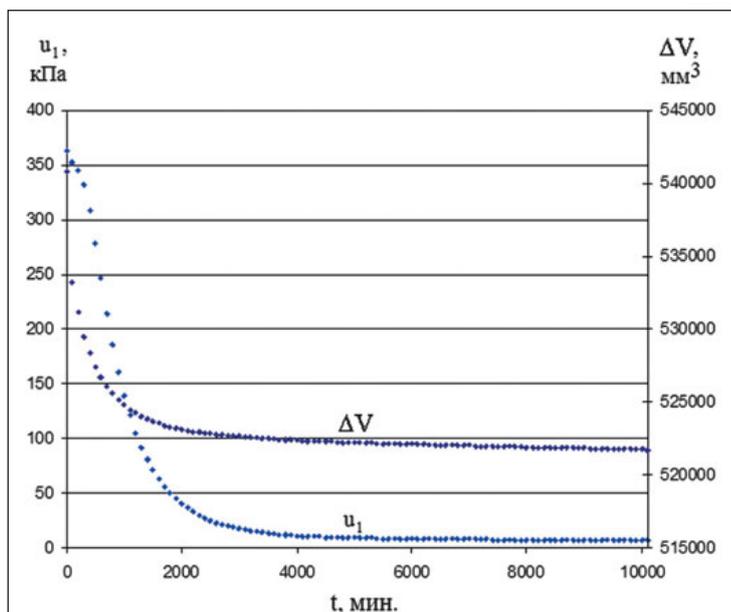


Рис. 10. Консолидация плотной глины: u_1 — поровое давление; ΔV — изменение объёма образца, t — время

надёжный контроль порового давления при лабораторных испытаниях грунтов, причины, их вызывающие, и, конечно, пути, вероятно, частичного решения указанных проблем. ☞

Таблица 3

Проблемы контроля порового давления при лабораторных испытаниях водонасыщенных в условиях природного залегания грунтов

Проблемы контроля порового давления при испытаниях	Причины	Пути решения
Неполное водонасыщение образцов, фильтров и системы измерения порового давления	<ul style="list-style-type: none"> • Присутствие заземленных газов; • потери влаги из периферических пор; • частичное осушение фильтров за счет всасывания влаги образцом 	<ul style="list-style-type: none"> • Создание противодавления (для песков); • повышение минимального главного напряжения σ_3; • анализ результатов в полных напряжениях; • анализ результатов исключительно по данным «дренированных» испытаний; • переход к методикам испытаний неводонасыщенных грунтов
Запаздывание значений порового давления на торце образца по сравнению с центральной частью	<ul style="list-style-type: none"> • Сжимаемость поровой жидкости; • низкая водопроницаемость грунта 	<ul style="list-style-type: none"> • Локальное измерение порового давления в центре образца (связные грунты); • использование укороченных образцов и смазки на полированных штампах (пески); • обоснованное ограничение скорости или частоты нагружения

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 13-05-01048 «Закономерности деформирования дисперсных грунтов в диа-

пазоне малых деформаций». Часть экспериментальных исследований выполнена на оборудовании, приобретенном за счет средств Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вознесенский Е.А. Динамическая неустойчивость несвязных грунтов: формы проявления и основные закономерности // Геоэкология. 1998. № 3. С. 34–54.
2. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 2010.
3. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: МНТКС, 2011.
4. ГОСТ 56353-2015. Грунты. Методы лабораторных динамических испытаний дисперсных грунтов. М.: Росстандарт, 2015.
5. Bishop A.W. The measurement of pore pressure in the triaxial test / Proceedings of the Conference on Pore Pressure and Suction in Soils. London: Butterworths, 1960.
6. Boer R. The engineer and the scandal: a piece of science history. Berlin: Springer, 2005. 293 p.
7. Clayton C.R.I. Stiffness at small strains: research and practice // Geotechnique. 2011. V. 61. № 1. P. 5–37.
8. Fredlund D.G. Theory formulation and application for volume change and shear strength problems in unsaturated soils / Proceedings of the 11-th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco, USA, 1985.
9. Fredlund D.G., Morgenstern N.R. Stress state variables for unsaturated soils // Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1977. V. GT5. P. 447–466, 1985.
10. Skempton A.W. The pore pressure coefficient in saturated soils // Geotechnique. 1960. V. 10. 1960. P. 186–187.
11. Voznesensky E.A., Nordal S. Dynamic instability of clays: an energy approach // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1999. V. 18. № 2. P. 127–135.