

УДК 624.131.385

Е.С. Кушнарева, Е.А. Вознесенский

## О ПРИМЕНИМОСТИ КОНЦЕПЦИИ КРИТИЧЕСКОЙ ПОРИСТОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПЕСКОВ

Некоторые авторы используют концепцию критической пористости песков для описания их поведения при динамическом воздействии. В статье описывается новая методика экспериментального определения критической пористости песков в условиях трехосного консолидированно-недренированного сжатия. В настоящее время технически невозможно прямое определение пористости песков непосредственно в зонах сдвига. Механизм динамического воздействия таков, что изменение порового давления и эффективных напряжений (косвенные показатели изменения пористости песков в недренированных условиях) происходит несколько раз даже за один цикл. Установлено, что в результате динамического нагружения водонасыщенные пески любой плотности стремятся к состоянию *нулевой динамической дилатансии*, в котором в песках формируются зоны сдвига постоянной толщины, в пределах которых и локализуется дальнейшее накопление деформаций. Исследование состояния нулевой динамической дилатансии имеет фундаментальное значение для оценки динамической устойчивости песков.

*Ключевые слова:* динамическая устойчивость, циклическая подвижность, коэффициент критической пористости, нулевая динамическая дилатансия, поровое давление, эффективные напряжения.

Several authors have introduced to apply critical void ratio concept to the problem of dynamic stability in sands. The paper describes new experimental technique for estimation of critical void ratio of sands in triaxial consolidated-undrained tests. At present there is a major technical problem in direct determination of critical void ratio in dynamic loading mode and especially within the shearing zones. It is demonstrated that the very notion of critical void ratio is not applicable under dynamic loads since pore pressure and effective stresses alter several times a cycle. However, cyclic mobility under dynamic loading of saturated sands with any relative density finally results in *zero dynamic dilatancy* state, which is related to the development of shear zones with constant width where subsequent strain accumulation is localized. Development of zero dynamic dilatancy in sands appears to be a general and fundamental pattern of their dynamic behavior.

*Key words:* dynamic stability, cyclic mobility, critical void ratio, zero dynamic dilatancy, pore pressure, effective stresses.

**Введение.** Устойчивость несвязных грунтов, их поведение и форма деформирования при динамическом воздействии при прочих равных условиях существенно зависят от плотности сложения песка, которую некоторые исследователи (А. Казагранде, Н.М. Герсеванов, В.А. Флорин, М.Н. Гольдштейн, Н.Н. Маслов и др.) предлагали рассматривать относительно критической плотности для данного песка (т.е. при пористости, равной критической). Однако в современной практике экспериментальных исследований предложены различные методики определения критической пористости только в условиях монотонного нагружения (в статических условиях), и в специальной литературе нет ни одного упоминания о методах определения критической пористости при динамическом воздействии. Ничего не известно о том, совпадают ли величины критической пористости при статическом и динамическом нагружении. Однако если ее величина меняется в зависимости от типа нагружения, то неизбежно возникает вопрос о влиянии параметров нагрузки не только на динами-

ческую устойчивость песков, но и на саму величину их критической пористости при разных формах воздействия.

**Методика исследований.** Для экспериментального решения этой проблемы на кафедре инженерной и экологической геологии МГУ им. М.В. Ломоносова были проведены две серии испытаний водонасыщенных образцов на автоматизированном стабилометре по недренированной схеме с контролем напряжений в режиме монотонного (для экспериментального определения величины критической пористости песков) и динамического консолидированно-недренированного трехосного сжатия. Формирование образцов велось методом сухой послойной отсыпки с последующим водонасыщением непосредственно в камере прибора. Перед водонасыщением через образец в течение 30 мин. пропускали (снизу вверх) углекислый газ для вытеснения из пор воздуха (углекислый газ полностью растворяется в воде). Это позволило получить полностью водонасыщенные образцы с параметром Скемптона  $B$ , равным 0,98—1,00, без приложения

противодавления. После контроля степени водонасыщения проводилась анизотропная консолидация с заданным соотношением начальных главных напряжений.

Результаты испытаний, как это принято в мировой практике, для дальнейшего анализа представляли в виде траекторий эффективных напряжений в координатной плоскости максимальных касательных  $q = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$  и средних эффективных  $p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$  напряжений.

**Методика определения критической пористости.** Для каждого песка проведена серия из 10—15 испытаний на образцах разной плотности (от рыхлых до плотных) в режиме монотонного консолидированно-недренированного трехосного сжатия с одной и той же скоростью нагружения после завершения анизотропной консолидации с заданным и постоянным во всех опытах соотношением эффективных напряжений.

Характерный вид траектории эффективных напряжений на примере песка средней крупности приведен на рис. 1. Анализ таких диаграмм, показывающих изменение соотношения между нормальными и касательными напряжениями по мере развития в песках деформаций, позволил установить стадийность этого процесса. По характерным перегибам на диаграммах выделены три основные стадии деформирования:

1) практически упругое сжатие воды и скелета грунта при деформациях обычно менее 0,1% — на этой стадии тенденция к изменению пористости еще не проявляется и поровое давление остается практически неизменным (участок АБ на диаграмме, рис. 1);

2) стадия формирования зон сдвига при существенно больших деформациях (участок БВ). Уровень накопленных деформаций зависит от крупности песка, плотности его сложения и изменяется от десятых долей до нескольких процентов к концу этой стадии. По нашим представлениям, деформирование грунта на этой стадии начинается с формирования локальных *зон малых смещений*, которые зарождаются при начальном незначительном по величине совместном смещении частиц без их отделения. Появляются

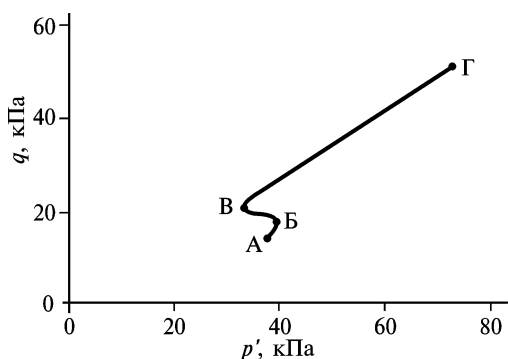


Рис. 1. Траектория эффективных напряжений на примере монотонного нагружения песка средней крупности

инструментально регистрируемые деформации сдвига. При этом тенденция к локальному изменению пористости в недренированных условиях нагружения отражается в изменении порового давления и эффективных напряжений в образце (эти изменения одинаковы по величине и противоположны по знаку). При дальнейшем увеличении нагрузки зоны смещения развиваются до *зон сдвига*, в которых становится возможным перемещение и даже «перескок» и перекатывание частиц уже относительно друг друга;

3) стадия дальнейшего развития деформаций в образце по уже сформированным зонам сдвига (участок ВГ). В зависимости от степени плотности и крупности песков уровень накапливаемых деформаций на этой стадии может изменяться от десятых долей до нескольких процентов. Для рыхлых песков это может быть даже 10—12%-й уровень деформаций.

В соответствии с общепринятым определением в настоящее время под критической понимают пористость, при которой *в зоне сдвига* не происходит изменение объема песка. При недренированном нагружении водонасыщенного песка это условие эквивалентно нулевым приращениям порового давления и эффективных напряжений.

По нашим представлениям, определяющим моментом является знак изменения среднего эффективного напряжения ( $\Delta p'$ ) именно на второй стадии — начальной стадии формирования зоны сдвига, — показывающий, выше или ниже критического значения оказалась пористость исследуемого образца. Так, на момент начала испытания после предварительной консолидации значение  $\Delta p' < 0$  указывает на тенденцию к уплотнению песка (отрицательную дилатансию), а  $\Delta p' > 0$  — на тенденцию к его разуплотнению (положительную дилатансию).

Исходя из физического смысла этого понятия за критическую пористость нами принималась такая начальная (на момент окончания предварительной консолидации) пористость грунта, при которой сдвигообразование на второй стадии происходило при неизменном среднем эффективном напряжении ( $\Delta p' = 0$ ), что на диаграмме выражается в вертикальном участке, соответствующем этой стадии (рис. 2, 1). Вертикальный участок диаграммы также соответствует нулевому изменению порового давления ( $\Delta u = 0$ ), что означает отсутствие тенденции к изменению объема образца при сдвиге, т.е. «нулевую» дилатансию. Именно условие  $\Delta u = 0$  было предложено еще Н.Н. Масловым (1959) в качестве критерия определения критической пористости.

Песок, уложенный рыхлее своего критического состояния ( $n > n_{кр}$ ), при сдвиге стремится к уплотнению, и траектория эффективных напряжений начиная с момента формирования в образце зон смещения (участок БВ) идет влево (рис. 2, 2), что соответствует уменьшению эффективных напряжений в образце ( $\Delta p' < 0$ ) и приросту порового давления ( $\Delta u > 0$ ). При сдвиге плотного песка ( $n < n_{кр}$ ) имеет место тенденция

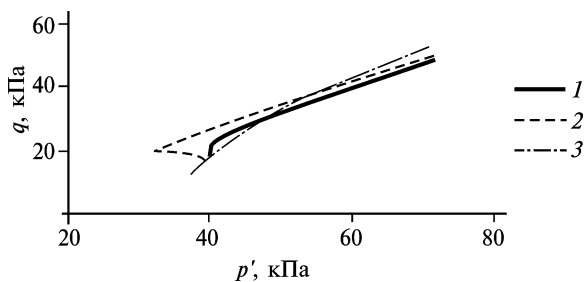


Рис. 2. Типичные траектории эффективных напряжений для песков разной плотности: 1 —  $n=n_{кр}$ ; 2 —  $n>n_{кр}$ ; 3 —  $n<n_{к}$

к его разуплотнению, что выражается в увеличении эффективных напряжений ( $\Delta p' > 0$ ) и снижении порового давления ( $\Delta u < 0$ ). В момент образования в таком образце зон смещения траектория эффективных напряжений (участок БВ) идет вправо (рис. 2, 3).

На рис. 3 приведен пример определения коэффициента критической пористости для песка средней крупности по результатам серии консолидированно-недренированных испытаний в условиях монотонного трехосного сжатия на водонасыщенных образцах разной плотности (степень плотности  $I_D$  изменялась от 0,25 до 0,57) при одинаковых условиях нагружения. По траекториям эффективных напряжений для каждого эксперимента определяли величину приращения эффективных напряжений  $\Delta p'$  на выделенной нами второй стадии сдвигообразования (участок БВ). Анализ графиков рассеяния этих приращений в зависимости от начального коэффициента пористости позволяет получить критическое значение последнего при условии нулевых изменений эффективных напряжений ( $\Delta p' = 0$ ).

**Характеристика объектов исследования.** Эксперименты проводили на 10 пробах природных и техногенных песков из разных регионов страны, характеристика состава и свойств которых приведена в таблице.

Изученная выборка разнообразна по составу и свойствам и представлена песками пылеватыми, мелкими и средней крупности разной степени окатанности и с разным характером поверхности зерен. Содер-

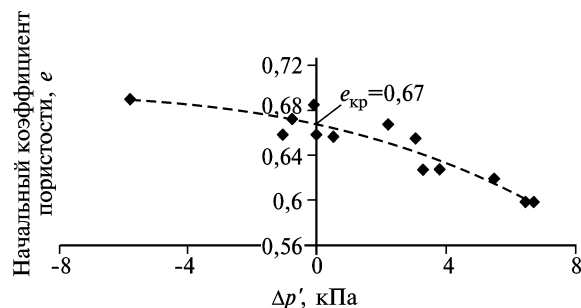


Рис. 3. Изменение средних эффективных напряжений ( $\Delta p'$ ) в зависимости от начального коэффициента пористости ( $e$ ) на примере песка средней крупности

жание пылеватых и глинистых частиц изменяется от 1 до 33%, причем установлено, что эти тонкие частицы могут находиться в порах между крупными зернами или на их поверхности относительно равномерно (в виде пленок), а также образовывать отдельные скопления, заполняющие неровности поверхности. Все изученные пески близки по минеральному составу. Преобладающие минералы в песчаной и пылеватой фракциях — кварц (63—89%) и полевые шпаты (6—18%). Глинистые минералы представлены в основном каолинитом, монтмориллонитом, гидрослюда и иллитом (каждый в отдельности не более 1%).

**Результаты исследований.** Проведенные исследования песков разного гранулометрического состава показали, что максимальные значения критической пористости характерны для песков мелких ( $n_{кр} = 43\div 46\%$ ), минимальные — для песков средней крупности ( $n_{кр} = 37\div 40\%$ ) и промежуточные — для пылеватых ( $n_{кр} = 40\div 44\%$ ). Для песков разной крупности отмечена тенденция к уменьшению критической пористости с улучшением окатанности частиц и уменьшением шероховатости поверхности зерен. Ее величина также уменьшается с увеличением действующих на образец сжимающих напряжений.

Впервые установлена зависимость критической пористости от скорости приложения к песку сдвигающих усилий, причем для песков разной крупности эта зависимость имеет различный характер. Так, с

**Общая характеристика строения, состава и свойств изученных песков**

Проба песка	Название по ГОСТ 25100-95	Геологический индекс	Содержание частиц по фракциям, мм, %							Плотность твердой фазы, $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	$e_{min}$	$e_{max}$
			<0,05	0,05—0,1	0,1—0,25	0,25—0,5	0,5—1	1—2	>2			
1	Песок пылеватый	aIV	33	17	24	8	2	4	12	2,63	0,58	1,04
2		tIV	9	26	64	1				2,66	0,60	1,03
3		mIII—IV	21	17	57	5				2,65	0,79	1,14
4			15	25	55	3	2			2,65	0,72	1,10
5	Песок мелкий	mIV	1	1	71	27				2,59	0,54	0,85
6		amIII—IV	4	1	84	11				2,62	0,54	0,87
7			mIII—IV	7	7	65	21			2,67	0,64	1,01
8	Песок средней крупности	mIV	2	2	21	30	15	30		2,63	0,47	0,77
9		a-mIV	2	1	40	21	11	22	3	2,59	0,47	0,76
10		mIII—IV	3	1	11	38	30	17		2,65	0,41	0,68

повышением скорости нагружения пески мелкие и пылеватые проявляют все большую тенденцию к разуплотнению (рис. 4, *а*), что в недренированных условиях отражается в увеличении эффективных напряжений и, вероятно, обусловлено взаимной фиксацией зерен, которая ограничивает их перемещения. Более крупные разности с увеличением скорости приложения нагрузки, наоборот, постепенно начинают проявлять тенденцию к уплотнению (рис. 4, *б*), что выражается в снижении эффективных напряжений и обусловлено, по мнению авторов, повышением их сжимаемости в результате частичного дробления наиболее крупных зерен.

Отсюда возникают вопросы: существует ли вообще понятие критической пористости при динамическом воздействии, а если существует, что тогда представляет собой эта величина и как ее можно определить. Также остается непонятным, как соотносятся между собой значения критической пористости при статическом ( $n_{кр(стат)}$ ) и динамическом ( $n_{кр(дин)}$ ) нагружении. Поскольку механизм деформирования песков в статических и динамических условиях сильно различается, само наличие фаз нагрузки и разгрузки предопределяет возможность переориентации и даже переупаковки частиц, что может выразиться в смене знака дилатансии, а иногда не один раз за цикл, то вполне вероятно, что  $n_{кр(стат)}$  и  $n_{кр(дин)}$  не совпадают.

Для проверки этой гипотезы проведены динамические недренированные трехосные испытания на водонасыщенных песках разной крупности. После водонасыщения и предварительной консолидации пористость образцов была равна критической, ранее определенной для каждого исследовавшегося

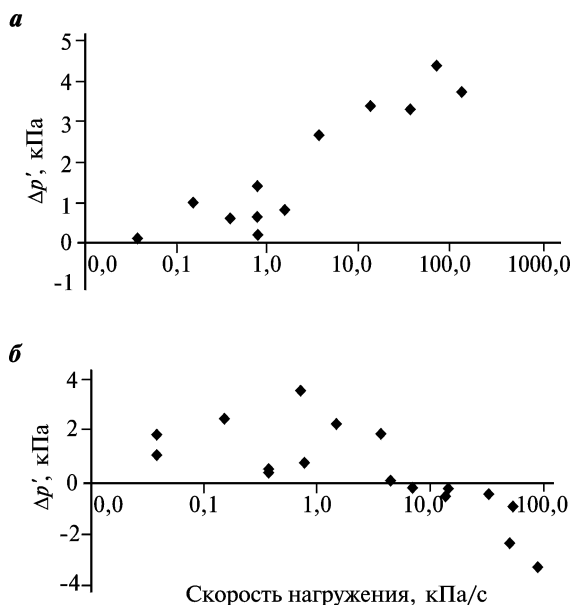


Рис. 4. Изменение эффективных напряжений в зависимости от скорости нагружения для песка мелкого (*а*) и средней крупности (*б*) при прочих одинаковых условиях подготовки образцов и проведения испытаний. Каждая точка соответствует одному эксперименту с образцом, уложенным с пористостью  $n = n_{кр}$

песка в условиях монотонного трехосного сжатия по описанной выше методике. Параметры динамической нагрузки (максимальные осевые напряжения и скорость их изменения в цикле) задавались в соответствии с параметрами монотонного нагружения при определении величины критической пористости. Результаты экспериментов также представлены в виде траекторий эффективных напряжений и приведены на рис. 5.

При оценке роли пористости песка в условиях динамического нагружения изменение порового давления и эффективных напряжений следует рассматривать за полный цикл при одинаковом уровне касательных напряжений, соответствующем, например, начальному ( $q_{нач}$ ) (рис. 5, *б*), а не на отдельных его фазах. Тогда при выполнении условий  $\Delta p'_d = 0$  и  $\Delta u_d = 0$  также можно говорить, что в целом песок не проявляет тенденцию к уплотнению или разуплотнению в ходе динамического нагружения.

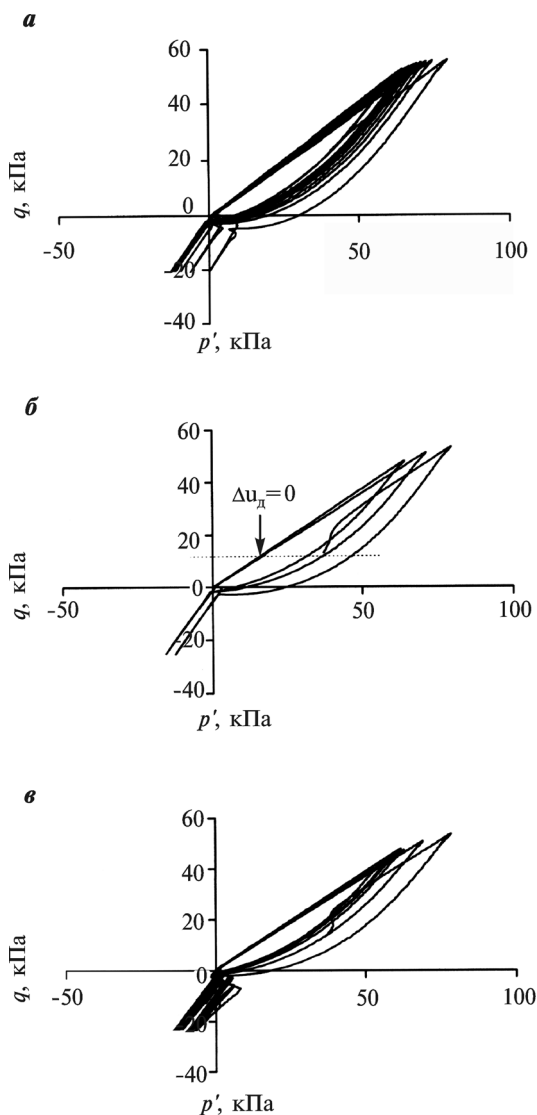


Рис. 5. Траектории эффективных напряжений при динамическом нагружении песка пылеватого (*а*), мелкого (*б*) и средней крупности (*в*) при пористости, равной критической для условий монотонного нагружения ( $n = n_{кр(стат)}$ )

Как было показано выше, в условиях монотонного нагружения выделяются три стадии деформирования грунта: 1) практически упругое сжатие воды и скелета, 2) стадия формирования зон сдвига и 3) дальнейшее деформирование песка по уже сформированным зонам сдвига. Исходя из самого понятия критической пористости постоянство порового давления и эффективных напряжений ( $\Delta p' = 0$ ,  $\Delta u = 0$ ) при недренированном трехосном сжатии в момент образования зон сдвига (вторая стадия) свидетельствует, что песок сформирован при критической пористости и поэтому не стремится ни уплотниться, ни разуплотниться.

Во всех проведенных динамических экспериментах (при начальном условии  $n = n_{кр(стат)}$ ) отмечается интересная особенность: в первом цикле воздействия участок траектории эффективных напряжений, соответствующий стадии формирования зон сдвига, для всех песков очень близок к вертикальному. Это свидетельствует, что перед приложением динамической нагрузки пористость образцов действительно соответствовала критической для статических условий нагружения.

При дальнейшем динамическом воздействии все изученные пески на разных стадиях цикла деформировались однотипно: на стадии нагрузки грунты проявляли тенденцию к разуплотнению, а при разгрузке — к уплотнению. В течение нескольких первых циклов (для каждого грунта это число циклов свое) во всех экспериментах отмечается уменьшение эффективных напряжений и соответственно увеличение порового давления за полный цикл при одинаковом уровне возникающих касательных напряжений ( $q$ ).

Как видно на рис. 5, во время первых циклов воздействия во всех изученных песках пористость снижается, т.е.  $\Delta p'_d < 0$ ,  $\Delta u_d > 0$ . После нескольких циклов воздействия тенденция к уплотнению песков (за каждый цикл) постепенно уменьшается до практически полного исчезновения. При этом траектории эффективных напряжений за отдельный цикл смыкаются, образуя «петлю», причем выполняется условие  $\Delta p'_d \approx 0$  и  $\Delta u_d \approx 0$  при  $q = q_{нач}$ .

Таким образом, пески разной крупности при пористости, равной критической, определенной для них в условиях монотонного сжатия ( $n = n_{кр(стат)}$ ), при динамическом нагружении с аналогичными параметрами стремятся к состоянию, при котором не возникает тенденция к их уплотнению или разуплотнению ( $\Delta p'_d \approx 0$  и  $\Delta u_d \approx 0$ ). Это состояние названо нами *нулевой динамической дилатансией*. По мнению авторов, в этом состоянии в песке уже сформировались зоны сдвига постоянной толщины, а дальнейшее развитие деформаций идет за счет увеличения смещения частиц в пределах этих зон. Изменения порового давления и, следовательно, эффективных напряжений за полный цикл в состоянии нулевой динамической дилатансии равны нулю. Это является следствием постоянства толщины зоны сдвига. Однако в разных

фазах цикла динамического нагружения несколько раз происходит смена знака  $\Delta u$ , что и является необходимым условием развития этого состояния.

Несмотря на то что условие, определяющее состояние нулевой динамической дилатансии (нулевые изменения порового давления и соответственно эффективных напряжений за полный цикл), аналогично условию деформирования песков с критической пористостью при сдвиге в процессе монотонного нагружения ( $\Delta u = 0$ ,  $\Delta p' = 0$ ), нельзя провести полную аналогию между  $n_{кр(стат)}$  и пористостью в зоне сдвига, которая формируется в песке при нулевой динамической дилатансии как форме реакции грунта на динамическое воздействие. К сожалению, пока технически невозможно оценить пористость песка непосредственно в зоне сдвига. Однако поскольку в разных фазах цикла воздействия происходит изменение порового давления (и к тому же с разным знаком), то и пористость песка как в зонах сдвига, так и в прилегающих к ним микрообъемах грунта должна при этом меняться, хотя в недренированных условиях нагружения и объем, и средняя пористость образца в целом остаются постоянными.

Установлено также, что развитие деформации по схеме циклической подвижности как универсальной форме проявления динамической устойчивости несвязных грунтов [Вознесенский, 2000; Casagrande, 1975; Castro et al., 1982; McRoberts, Sladen, 1992; Ibsen, 1994] на определенной стадии приводит к состоянию нулевой динамической дилатансии вне зависимости от того, является ли циклическая подвижность прогрессирующей или затухающей (рис. 6).

Кроме того, состояние нулевой динамической дилатансии не исключает возможность «начального» [Seed, Lee, 1966] или «кратковременного» [Vaid,

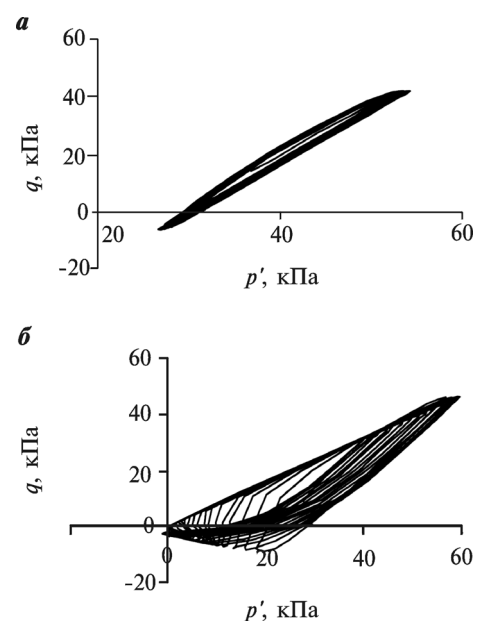


Рис. 6. Траектории эффективных напряжений при деформировании плотного песка средней крупности по схеме циклической затухающей (а) и прогрессирующей (б) подвижности

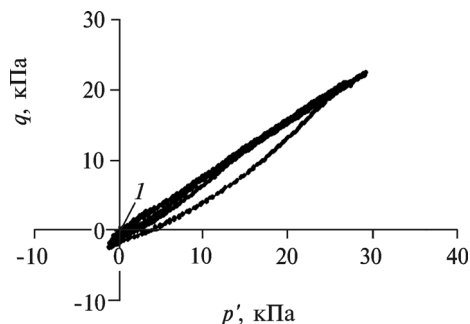


Рис. 7. Траектория эффективных напряжений при динамическом нагружении песка средней крупности: точка 1 соответствует условию «начального» или «кратковременного» разжижения ( $q = 0$ ,  $p' = 0$ )

Chern, 1983; Byrne, McIntyre, 1995] разжижения песка — это мгновенное состояние, когда в одном из циклов накопленное избыточное поровое давление в первый раз достигает величины сжимающих напряжений ( $p' = 0$ ), а траектория эффективных напряжений проходит через начало координат (рис. 7).

Выявлено также, что состояние нулевой динамической дилатансии по мере увеличения числа циклов воздействия приобретают пески любой плотности сложения, однако число циклов, необходимое для достижения этого состояния, зависит от плотности сложения песка. На рис. 8 приведены траектории

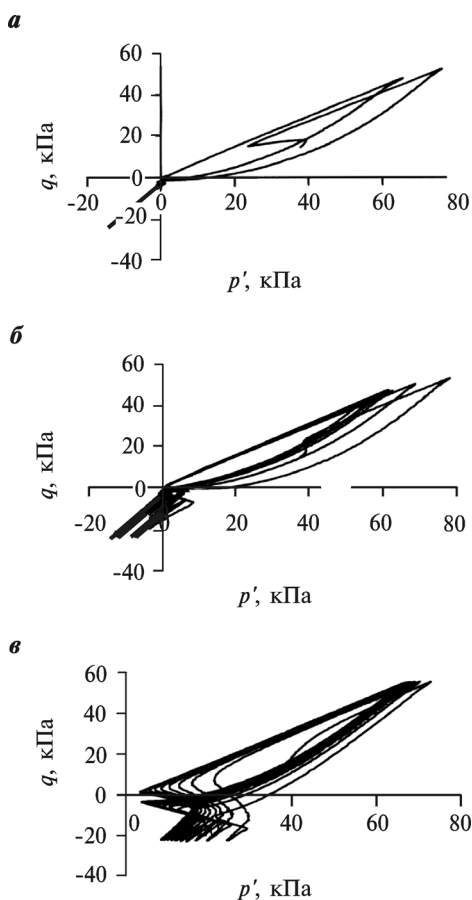


Рис. 8. Траектории эффективных напряжений при динамическом нагружении песка средней крупности при пористости выше (а), равной (б) и ниже (в) критической

эффективных напряжений при динамическом нагружении песка средней крупности при разной плотности ( $I_D = 0,29 \div 0,78$ ), т.е. динамические испытания были проведены на образцах, для которых  $n > n_{кр(стат)}$  и  $n < n_{кр(стат)}$ .

Получено, что как в плотных, так и в рыхлых песках в начале нагружения отмечается уменьшение эффективных напряжений и соответственно увеличение порового давления за полный цикл нагрузки ( $\Delta p'_d < 0$  и  $\Delta u_d > 0$ ). Степень этого эффекта уменьшается с каждым циклом — петли траектории эффективных напряжений постепенно сближаются все больше. Возможно, в первые циклы динамического воздействия в зонах сдвига постепенно происходит переупаковка частиц в такое положение, при котором песок уже не проявляет тенденцию ни к уплотнению, ни к разуплотнению, а стремится к состоянию нулевой динамической дилатансии.

На рис. 8 также видно, как меняется направление траекторий эффективных напряжений в момент формирования в образце зон смещений в зависимости от плотности сложения песков. Отдельное рассмотрение траекторий эффективных напряжений в фазе нагружения в первом цикле воздействия подтверждает наши рассуждения о стадийности деформирования песков при сдвиге и возможности определения их критической пористости в условиях монотонного нагружения при помощи анализа  $q - p'$ -диаграмм, методика которого рассмотрена выше. Так, рыхлый песок (рис. 8, а) в момент формирования зон сдвига проявляет тенденцию к уплотнению — траектория эффективных напряжений идет влево ( $\Delta p' < 0$ ). Плотный песок (рис. 8, б) проявляет тенденцию к разуплотнению — траектория идет вправо ( $\Delta p' > 0$ ). Песок же, уложенный при пористости, равной критической (рис. 8, в), определенной для него в условиях монотонного нагружения, в момент образования зон сдвига не проявляет тенденцию ни к уплотнению, ни к разуплотнению, о чем свидетельствует соответствующий вертикальный участок  $q - p'$ -диаграммы ( $\Delta p' = 0$ ).

Известно, что реакция несвязного грунта на динамическое воздействие в значительной степени зависит от параметров нагружения, в частности от асимметрии цикла действующей нагрузки — относительных перепадов напряжений в цикле нагрузки, которые количественно можно охарактеризовать приведенным коэффициентом асимметрии цикла:

$$\rho_c = \frac{\sigma'_{1\min} - \sigma'_{3c}}{\sigma'_{1\max} - \sigma'_{3c}},$$

где  $\sigma'_{1\min}$  и  $\sigma'_{1\max}$  — минимальные и максимальные осевые напряжения в цикле, выраженные в эффективных значениях, кПа;  $\sigma'_{3c}$  — боковое сжимающее эффективное напряжение, кПа.

В результате проведенных нами методических исследований влияния асимметрии действующей

нагрузки на динамическую устойчивость песков установлено существование критического значения коэффициента асимметрии цикла  $\rho_{c(крит)}$  [Кушнарева, 2008], при котором достижение состояния нулевой динамической дилатансии, т.е. формирование в песке зон сдвига максимально возможной для данных условий толщины, происходит практически сразу, т.е. начиная со 2—3-го цикла. При динамическом нагружении с другими значениями коэффициента асимметрии нагрузки  $\rho_c$  (при прочих одинаковых условиях) состояние нулевой динамической дилатансии достигается за большее число циклов (рис. 9).

Возможно, параметры динамической нагрузки влияют не только на число циклов нагружения, необходимых для достижения состояния нулевой динамической дилатансии, но и на пористость песка в сформированной при этом зоне сдвига постоянной толщины. Так, при разных значениях коэффициента асимметрии ( $\rho_c$ ) и прочих одинаковых условиях может существовать свой диапазон изменения пористости в этой зоне сдвига в процессе динамического нагружения (аналогично тому, что каждой величине нормальной нагрузки в условиях монотонного нагружения соответствует единственное значение критической пористости  $n_{кр}$ ).

Исходя из установленной нами зависимости величины критической пористости песка  $n_{кр}$  от скоро-

сти приложения нагрузки [Кушнарева, 2008] можно предположить существование зависимости изменения пористости в зоне сдвига в состоянии нулевой динамической дилатансии от частоты динамического воздействия, которая при одной и той же амплитуде напряжений непосредственно определяет скорость изменения нагрузки.

Таким образом, пористость в зоне сдвига в состоянии нулевой динамической дилатансии изменяется в зависимости от структурных особенностей песков, а также от параметров динамической нагрузки — амплитуды, частоты и асимметрии цикла.

В настоящее время из-за многочисленных нерешенных теоретических и технических вопросов, а также сложности одновременного учета всех параметров динамической нагрузки не существует методики прямого определения пористости песков в зоне сдвига в условиях динамического нагружения. Разработку таких методик следует считать весьма перспективным направлением исследований в области динамики несвязных грунтов, поскольку их реализация позволила бы экспериментально подтвердить или опровергнуть те логические заключения, которые сделаны авторами статьи и другими исследователями на основе измерения средних значений порового давления и деформаций для всего объема образца. Возможности решения этой интересной задачи может предоставить, например, использование датчиков локальных деформаций и порового давления на основе эффекта Холла и их миниатюризации [Clayton et al., 1989].

**Выводы.** 1. Критическая пористость песка не является инвариантной относительно условий ее определения и помимо структурных особенностей самого грунта и сжимающего напряжения зависит от скорости приложения сдвигающей нагрузки. Это сужает круг задач, в которых ее величину можно использовать в качестве параметра состояния несвязных грунтов.

2. Накопленный опыт динамических испытаний (по недренированной схеме) с песками различной плотности позволяет предположить, что понятие критической пористости песков неприменимо в условиях динамического воздействия, поскольку даже за один цикл воздействия (в фазах нагрузки и разгрузки) происходит изменение порового давления и эффективных напряжений. Кроме того, знак этих приращений меняется несколько раз за полный цикл воздействия.

3. При динамическом нагружении в ходе циклической подвижности (как затухающей, так и прогрессирующей) развивается состояние *нулевой динамической дилатансии*. Это состояние связано с формированием зон сдвига постоянной толщины, где и локализуется дальнейшее накопление деформаций. Это состояние является завершающим этапом циклической подвижности и постепенно развивается в водонасыщенных песках любой плотности.

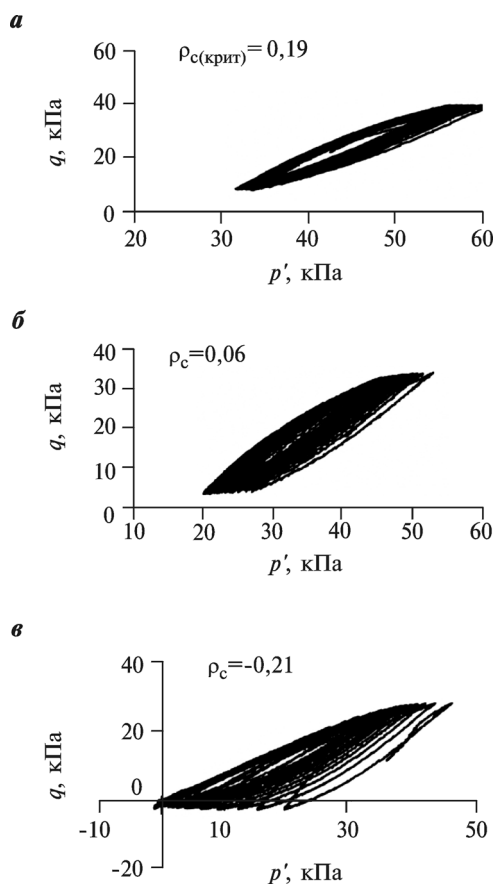


Рис. 9. Траектории эффективных напряжений при динамическом нагружении песка средней крупности с разной асимметрией цикла нагрузки ( $\rho_c$ ) при прочих равных условиях

4. Число циклов нагружения, необходимое для достижения состояния нулевой динамической дилатансии, определяется параметрами динамической нагрузки. Так, существует критическое значение асимметрии цикла нагрузки, при котором зоны

сдвига постоянной толщины формируются в песках практически сразу, начиная со 2—3-го цикла, на фоне минимального при данных условиях воздействия трения в системе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Вознесенский Е.А.* Динамическая неустойчивость грунтов: Автореф. докт. дис. М., 2000.

*Кушнарёва Е.С.* Устойчивость водонасыщенных песков при динамическом воздействии: Автореф. канд. дис. М., 2008.

*Маслов Н.Н.* Условия устойчивости водонасыщенных песков. М.: Госэнергоиздат, 1959.

*Byrne P.M., McIntyre J.* Effective stress liquefaction analysis at the Wildlife site // Proceed. 3rd Intern. Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake and Soil Dynamics. St. Louis. (Miss.), 1995. P. 141—148.

*Casagrande A.* Liquefaction and cyclic deformation of sands. A critical review // Lecture at 5<sup>th</sup> Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Buenos Aires, 1975. Vol. 5. P. 80—133.

*Castro G., Enos J.L., France J.W., Poulos S.J.* Liquefaction induced by cyclic loading / National Science Foundation NSF/CEE-82018. 1982.

*Clayton C.R.I., Khattrush S.A., Bica A.V.D., Siddique A.* The use of Hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation // Geotechnical Testing J. 1989. Vol. 12, N 1. P. 69—76.

*Ibsen L.B.* The stable state in cyclic triaxial testing on sand // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1994. Vol. 13, N 1. P. 63—72.

*McRoberts E.C., Sladen J.A.* Observations on static and cyclic sand-liquefaction methodologies // Canad. Geotechnical J. 1992. Vol. 29. P. 650—665.

*Seed H.B., Lee K.L.* Liquefaction of saturated sands during cyclic loading // J. of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE. 1966. Vol. 92, N SM6. P. 105—134.

*Vaid Y.P., Chern J.C.* Mechanism of deformation during cyclic undrained loading of saturated sands // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1983. Vol. 2, N 2. P. 171—176.

Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,  
кафедра инженерной и экологической геологии:

Е.С. Кушнарёва — науч. сотр.,  
e-mail: lekush@mail.ru;

Е.А. Вознесенский — профессор,  
e-mail: eugene@geol.msu.ru

Поступила в редакцию  
06.06.2008