

УДК 624.131

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ СЕЙСМОУСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВ

© 2016 г. В. Н. Кутергин, В. В. Севостьянов, К. В. Панков, Р. Г. Кальбергенов,
Л. В. Григорьева

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000, Россия. E-mail: vank@bk.ru*

Поступила в редакцию 03.12.2014 г.

После исправления 15.03.2015 г.

Предложена методология оценки сейсмостойчивости грунтов, включающая: анализ сейсмологических данных с учетом грунтовых условий, выбор и назначение параметров амплитудно-частотного спектра, экспериментальные исследования образцов грунтов с заданными параметрами циклического нагружения, анализ зависимостей поведения грунтов от коэффициента перегрузки, расчет коэффициента безопасности на основе сопоставления принятого и предельного уровня воздействия. Приведены результаты практического применения разработанного методического подхода к оценке сейсмостойчивости площадки шельфа северной части Каспийского моря.

Ключевые слова: *сейсмостойчивость, грунты шельфа, циклические испытания, параметры воздействия, коэффициент перегрузки, коэффициент безопасности.*

Обеспечение устойчивости сооружений в сейсмоопасных зонах – одна из важных задач исследований для проектирования и строительства, особенно актуальная для площадок разведки и добычи природного сырья, расположенных на континентальном шельфе морей, поскольку аварии могут представлять экологическую угрозу обширным площадям водных акваторий.

Перспектива освоения шельфа морей связана с необходимостью размещения морских нефтегазодобывающих сооружений в сложных инженерно-сейсмологических и инженерно-геологических условиях на основаниях, сложенных водонасыщенными дисперсными грунтами, причем изменение местоположения объектов малодопустимо.

В процессе возведения и эксплуатации система сооружения – основание воспринимает широкий спектр нагрузок и воздействий, в том числе циклические горизонтальные нагрузки при возможных землетрясениях.

К таким сооружениям предъявляют повышенные требования по безопасности и надежности. При этом, для прогноза осадок и устойчивости основания один из определяющих факторов – правильный выбор требуемых характеристик прочностных и деформационных свойств грунтов и их достоверная оценка на основе экспериментальных исследований.

Для обеспечения безаварийной эксплуатации сооружений, передающих или воспринимающих динамические нагрузки через грунтовое основание, необходимо тщательно изучать возможные изменения характеристик грунтов при такого рода воздействиях. Однако закономерности и природа изменения свойств грунтов изучены далеко недостаточно. Анализ обширной известной литературы о поведении грунтов при динамических воздействиях показывает, что результаты исследований и выводы исследователей чрезвычайно противоречивы. Так, природа изменения прочности грунтов рядом ученых объяснялась изменением коэффициента внутреннего трения и сцепления грунтов, причем решающим фактором принималась величина ускорения колебаний.

В то же время другие исследователи придерживаются противоположного мнения, заключающегося в том, что изменение сопротивления грунтов сдвигу при динамических воздействиях происходит не за счет изменения параметров прочности грунта, которые остаются постоянными, а в связи с кратковременными изменениями напряженного состояния пород при знакопеременных нагрузках или перераспределением напряжений между поровой водой и скелетом грунта. В связи с появлением современной приборной базы большое внимание стало уделяться действию инерционных сил или динамическим напряжениям в грун-

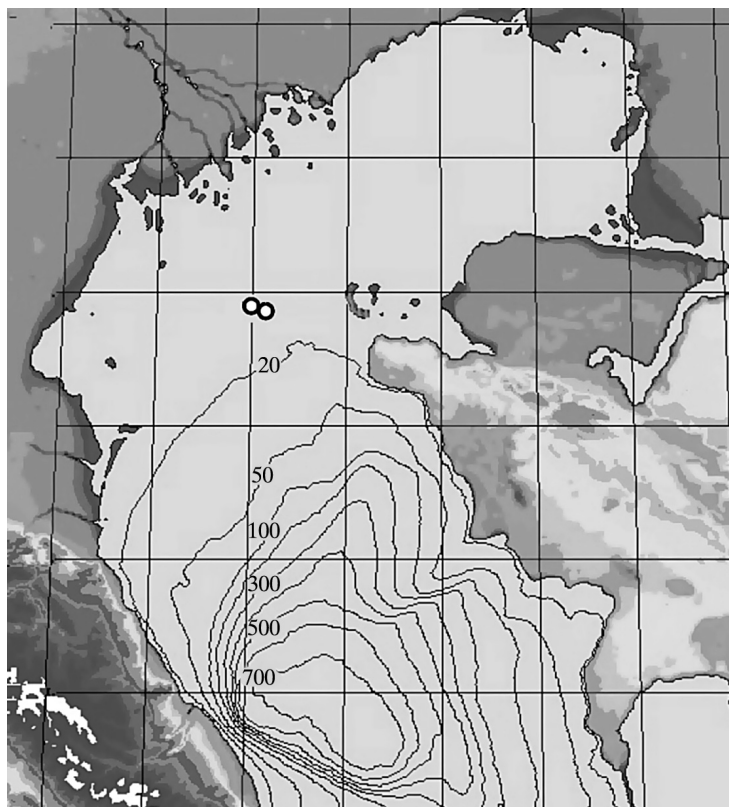


Рис. 1. Местоположение площадки в центральной части Северного Каспия.

тах как основному фактору при анализе отклика грунта на воздействия.

Кроме того, существует точка зрения, объясняющая реакцию грунтов на динамическое воздействие усталостным разрушением материала. Под усталостью обычно понимают снижение

прочности и увеличение деформируемости в условиях циклического нагружения. Однако до сих пор нет единой теории усталостного разрушения даже для сплошных материалов, в частности металлов. Для грунтов это явление остается слабоизученным.

Таблица 1. Строение грунтового массива основания

Стратиграфический индекс		№ ИГЭ	Глубина залегания подошвы от дна, м	Наименование грунтов
IIIh	IIIh _{v2}	2-1	2.0-2.9	Суглинки и глины мягкопластичные Супеси текучие Пески пылеватые средней плотности и плотные Супеси пластичные
		2-2	2.0-4.35	
		3-1	7.1-7.9	
		3-2	3.25-3.7 5.4-5.8	
	IIIh _{v1}	4-1	10.0-10.6 12.0-13.0	Пески пылеватые плотные Супеси пластичные с прослойками песка пылеватого и суглинка мягко- и тугопластичного
		4-2	7.9-8.5 10.8-11.9	
			15.3-15.9	
	IIIh _{v1}	5	17.2-17.6	Глины и суглинки преимущественно мягкопластичные, известковистые

Таблица 2. Обобщенные характеристики физических свойств, прочности и деформируемости (при статических условиях нагружения) изученных грунтов

Номер ИГЭ	Глубина залегания подошвы от дна, м	Характеристика грунтов	Плотность, г/см ³	Влажность, W %	Коэффициент пористости, д.е.	Пластичность, %			Модуль общей деформации, E ₀ , МПа	Прочность	
						W _L	W _P	I _P		C, кПа	φ, град.
2-1	2.0-2.9	Суглинки и глины мягкопластичные	1.96	27.5	0.765	33.0	20.2	12.8	7.8	23	14
2-2	2.0-4.35	Супеси текучие	1.99	22.0	0.652	21.6	17.8	3.8	4.9	9	30
3	3.25-3.7	Пески пылеватые с прослойками супеси	1.97	23.0	0.704	24.2	20.5	3.7	12.1	6	30
(3-1 и 3-2)	5.4-5.8	пластичной									
4-1	7.1-7.9	Пески пылеватые	1.96	25.9	0.739				22.6	6	33
	10.0-10.6										
	12.0-13.0										
4-2	7.9-8.5 10.8-11.9 15.3-15.9	Супеси пластичные с прослойками песка пылеватого и суглинка мягко- и тугопластичного	1.95	26.6	0.734	27.6	23.2	4.4	20.8	12	30
5	17.2-17.6	Глины и суглинки преимущественно мягкопластичные, известковистые	1.89	34.5	0.950	41.3	24.5	16.8	16.5	24	15

В целом, процесс поиска научно обоснованной теории, объясняющей природу и механизм изменения механических характеристик грунтов при динамических воздействиях, еще далек от завершения. К сожалению, это находит отражение в недостаточном развитии к настоящему времени соответствующей отечественной нормативно-методической базы и документов, в частности, регламентирующих требования и методические подходы к оценке влияния динамических воздействий на грунты шельфа. На сегодняшний день известны лишь два документа [2, 3], участие в разработке которых принимали некоторые из авторов настоящей статьи, но эти нормативы нуждаются в обновлении и постоянном улучшении.

Все это обуславливает важность и необходимость выполнения специальных экспериментальных исследований для оценки поведения грунтов основания каждого объекта, подвергаемого динамическим воздействиям, особенно для сооружений повышенного класса ответственности.

Основная цель исследований заключалась в разработке методического подхода к оценке сейсмостойчивости грунтовых оснований сооружений. Последовательные шаги к этому включали:

- анализ сейсмологических данных;
- выполнение лабораторных экспериментов;
- оценку возможности изменения механических свойств вплоть до разжижения водонасыщенных дисперсных грунтов при знакопеременных нагрузках, моделирующих сейсмические воздействия различного уровня.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРИБОРЫ И МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ

Разработку основных аспектов методологии оценки сейсмостойчивости грунтов континентального шельфа рассмотрим на примере региона Каспийского моря, где в настоящее время идет интенсивное освоение месторождений природного сырья. При этом грунтовые основания проектируемых и возводимых гидротехнических сооружений нередко оказываются в зонах проявлений сейсмичности различного уровня.

Каспийское море – внутренний бассейн, не имеет связи с океаном и расположено в обширной материковой депрессии на границе Европы и Азии. В физико-географическом отношении и

по строению грунтовой толщи, море делится на части: северную (Северный Каспий), среднюю (Средний Каспий) и южную (Южный Каспий).

Северный Каспий – мелководный, средняя глубина 4.4 м (при отметке уровня моря –28.0 м от Балтийской системы высот (БС)), максимальные глубины на границе со Средним Каспием – 20 м. В качестве объектов исследований выбраны грунты площадки месторождения природного сырья, расположенной в центральной части Северного Каспия (рис. 1). Характерные глубины в данном районе 10–15 м. Грунтовый массив основания характеризуется следующим строением (табл. 1).

Для исследования влияния сейсмических воздействий на грунты основания площадки выбраны представительные образцы из шести инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Образцы грунтов из скважин доставлялись в лабораторию в тонкостенных запаянных стаканах из нержавеющей стали (диаметром 8.9–10.2 м и длиной ~ 100 см). Это обеспечило сохранность структуры образцов и исходной природной плотности-влажности. Обобщенные характеристики физических свойств, прочности и деформируемости (при статических условиях нагружения) изученных грунтов, полученные в результате статистической обработки массивов данных, представлены в табл. 2. Эти показатели приняты в качестве исходных для последующей оценки их изменения в результате действия знакопеременных циклических нагрузок.

Лабораторные экспериментальные работы выполнялись с использованием специальных испытательных устройств.

Для передачи на образец знакопеременных циклических нагрузок с контролируемой амплитудой напряжений или деформаций использовался стабилометр Wikeham Farrance с сервопневматической программируемой системой управления и регистрацией параметров эксперимента, а также стабилометр СТ-70Д. Динамическое нагружение производилось на фоне действующих статических нагрузок, моделирующих природное напряженно-деформированное состояние грунта.

Для выполнения сдвиговых испытаний грунтов, как при статическом, так и динамическом нагружении использовался прибор циклического сдвига ПЦС-3, оснащенный пульсаторами, генерирующими программируемые осевые вертикальные и сдвигающие горизонтальные циклические нагрузки.

Основным методом исследований являлось динамическое трехосное сжатие, аналогичное рекомендованному стандартами ASTM D 3999–91, ASTM D 5311–02 [6, 7]. При испытаниях на циклический сдвиг практиковался метод, аналогичный разработанному в Норвежском геотехническом институте (NGI) [8].

В самом общем виде параметры сейсмических воздействий, как циклических нагрузок, характеризовались общей продолжительностью t , средней частотой f , пиковыми значениями касательных напряжений $\tau_d = \tau_{\max}$ и $\tau_d = \tau_{\min}$, которые упрощенно принимались гармонически изменяющимися во времени.

Использованные методики динамических испытаний позволили оценить:

- динамические модули сдвига дисперсных грунтов при малых деформациях (порядка 10^{-5} – 10^{-2} д.е.);
- возможность разупрочнения связных грунтов;
- возможность разупрочнения вплоть до разжижения несвязных и малосвязных грунтов;
- увеличение деформируемости грунтов при нагрузках в допредельной области.

Методика консолидированно-недренированных циклических испытаний (CUC) для оценки сейсмостойчивости

Для оценки возможности разупрочнения вплоть до разжижения грунтов выполнялись трехосные консолидированно-недренированные циклические испытания образцов (CUC).

Образцы грунтов цилиндрической формы длиной до 15.0 см и диаметром ≈ 7.0 см устанавливались в прибор и подвергались полному водонасыщению, которое контролировалось величиной параметра Скемптона $B > 0.95$.

Затем образцы изотропно или анизотропно ($K_0 = 1$ или $K_0 \neq 1$) консолидировались в камере трехосного сжатия при статических нагрузках с величиной бокового эффективного напряжения σ'_3 . После стабилизации деформаций дренирование грунта прекращалось и в недренированных условиях производилось циклическое нагружение.

Сейсмические нагрузки с заданной частотой воздействия f (Гц) моделировались путем приложения циклических осевых σ_d (касательных τ_d) напряжений (кПа).

Касательное напряжение τ_d в элементе массива грунта, расположенного на глубине z и подвергаемого действию сейсмических волн с ускорением a_{\max} определяется как:

$$\tau_d = \frac{a_{\max}}{g} \cdot \rho \cdot z = \frac{a_{\max}}{g} \cdot \sigma'_1,$$

где ρ – плотность грунта; g – ускорение свободного падения; $\sigma'_1 = \rho \cdot z$ – вертикальное напряжение.

Уровень воздействия оценивался коэффициентом перегрузки K_n (относительной амплитудой циклических напряжений):

$$K_n = \frac{\tau_d}{\sigma'_1} = \frac{\sigma_d}{2 \cdot \sigma'_1} = \frac{a_{\max}}{g}.$$

Этот параметр задавался в опытах уровнями 0.05; 0.1; 0.15; 0.2; 0.25; 0.3; 0.35; 0.4 д.е. и более.

Для случая изотропно консолидированных образцов:

$$K_n = SR = \frac{\tau_d}{\sigma'_3} = \frac{\sigma_d}{2 \cdot \sigma'_3},$$

где SR – коэффициент напряжений (stress ratio [7]).

В ходе испытаний постоянно регистрировались циклические осевые напряжения σ_d , циклические осевые деформации ϵ_d и значения относительного порового давления U/σ'_3 .

Основными критериями достижения разжижения или циклической подвижности грунта являлись:

- прогрессирующий рост относительных осевых циклических деформаций ϵ_d ;
- прогрессирующий рост амплитуды циклических деформаций $A\epsilon_d$;
- рост отношения порового давления к эффективной объемной нагрузке U/σ'_3 до значений 0.8–0.9;
- достижение амплитудных значений деформаций сдвига, характерных для разрушения данного вида грунта при статических испытаниях.

Методика консолидированно-дренированных циклических испытаний (DSc) для определения модуля сдвига

Динамический модуль сдвига G_d при относительных динамических деформациях сдвига в диапазоне от $\epsilon_d \approx 10^{-5}$ до $\epsilon_d \approx 10^{-2}$ устанавливался по результатам сдвиговых динамических испытаний (DSc) и определений скорости поперечных

волн при помощи *bender element (BE)*. Испытания DSc проводились при вертикальной статической уплотняющей нагрузке σ'_1 и горизонтальных циклических напряжениях τ_d различного уровня. Результат этих исследований – выявление зависимости $G_d = f(\epsilon_d)$. Также при σ'_1 , соответствующей глубине залегания рассматриваемого элемента грунта и возможной дополнительной нагрузке от сооружения, методом BE определялся максимальный динамический модуль сдвига $G_{d\max}$ при наименьших значениях $\epsilon_d \approx 10^{-5}$.

Испытания грунтов проводились в приборе циклического сдвига ПЦС-3 на образцах цилиндрической формы высотой 3.5 см и диаметром 7.1 см. Образцы природной плотности-влажности помещались на нижний штамп прибора, заключались в резиновую оболочку и полностью водонасыщались.

Использовалась консолидированно-дренированная схема испытаний. Для этого первоначально, при открытых дренажах, с помощью нагрузочного устройства создавалась необходимая вертикальная сжимающая нагрузка σ'_1 . Передача осевого давления σ'_1 производилась одномоментно и продолжалась до завершения процесса консолидации.

Регистрация циклических сдвиговых напряжений τ_d , циклических деформаций сдвига ϵ_d производилась постоянно и выражалась в виде графиков их развития по циклам нагружения N . В опытах, где циклические напряжения развивались в допредельной области, выполнялось нагружение до стабилизации амплитуды деформаций, но длящееся не менее 100 циклов.

Динамический модуль сдвига G_d грунтов определялся из соотношения размаха (удвоенной амплитуды $2A\tau_d$) динамических напряжений сдвига τ_d и соответствующих значений размаха ($2A\epsilon_d$) относительных циклических сдвиговых деформаций образца ϵ_d :

$$G_d = 2A \tau_d / 2A \epsilon_d \text{ [МПа]}.$$

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выполненные исследования сейсмоустойчивости грунтов включали следующие основные этапы.

А. Анализ сейсмологических данных, оценка и выбор значений параметров воздействий для лабораторного моделирования.

При оценке количественных параметров возможных сейсмических воздействий могут использоваться различные методы. В рамках выполненных исследований авторы опирались на методологию, примененную при разработке нормативных карт ОСР-97, дополненную использованием корреляционных соотношений между магнитудой землетрясений, амплитудами сейсмических колебаний, их частотным составом и длительностью колебаний на уровне 0.5 от максимальной амплитуды из фундаментальной работы по сейсмическим воздействиям Ф.Ф. Аптикаева [1].

Рассматриваемый район располагается в зоне сочленения трех крупных разновозрастных тектонических структур: докембрийской Русской платформы, эпимезозойской Скифско-Туранской плиты и Альпийского складчатого пояса. Мощность осадочных отложений (платформенный чехол) составляет 2–10 км.

Согласно схеме тектоники Северо-Каспийского региона, район находится в области структур Скифской (Мангышская впадина) и Туранской плит (Мангышлакско-Устюртские впадины). По схеме активных разломов Каспийского региона в пределах Северного Каспия выделяются разломы Карпинского и Мангышлак-Устюртской субширотной ориентировки и их подводные продолжения, а также северный сегмент Аграно-Эмбенского разлома, ориентированный с ЮЗ на СВ.

В регионе Северного Каспия, по историческим и инструментальным данным, не наблюдалось сильных землетрясений от местных очагов. Сейсмическая опасность этого района определяется, главным образом, транзитными сотрясениями (воздействиями от удаленных землетрясений) с магнитудой $M = 7-8$ из Кавказ-Копетдагской сейсмоактивной зоны (расстояние 450–500 км) и Дагестанской зоны Северо-Восточного Кавказа ($M = 6-7$, расстояние 150–200 км), а также, согласно нормативной карте сейсмического районирования ОСР-97-С Уломова В.И., возможной, так называемой “местной сейсмичностью” в домене с $M = 5$. Район размещения площадки располагается в зоне с уточненной сейсмичностью 6.8 баллов, при повторяемости сотрясений 1 раз в 5000 лет [5]. Такая оценка дана для “средних” грунтовых условий, т.е. для грунтов II категории по сейсмическим свойствам в соответствии с табл. 1 СНиП II-7-81* [4].

По данным наших исследований, инженерно-геологических свойств грунтовой толщи площадки, верхняя часть разреза представлена

водонасыщенными песками, супесями пластичными и текучими, суглинками и глинами мягкими и текучепластичными. По физико-механическим свойствам эти песчано-глинистые отложения в соответствии с табл. 1 СНиП II-7-81* могут быть отнесены к грунтам III категории по сейсмическим свойствам.

Таким образом, с учетом конкретных инженерно-геологических условий (грунты III категории) и уточненной карты ОСР-97-С сейсмичность изучаемой площадки оценивается в 7.8 балла по действующей сейсмической шкале MSK-64.

Результаты расчетов сейсмических воздействий на площадке от очага “местной сейсмичности” по разным оценкам дают максимальную амплитуду горизонтальной составляющей ускорения колебаний $a_{\max} = 108-176 \text{ см/с}^2$ при преобладающем периоде $Ta_{\max} = 0.11-0.20 \text{ с}$ и эффективной продолжительности колебаний $t_{0.5} \approx 3.5-4 \text{ с}$.

Для “местных” землетрясений важно учитывать также наличие слоев слабых глинистых и органоминеральных грунтов, ухудшающее сейсмические свойства и повышающее категорию до III и III* (соответственно оценку сейсмичности до 8 и 8* баллов).

На основе анализа инженерно-геологической и сейсмологической информации для лабораторного моделирования сейсмических воздействий на грунты основания площадки и оценки их устойчивости принято использование следующих параметров, характеризующих наихудшие сейсмические условия.

При моделировании “местных” землетрясений:

- максимальное ускорение (a_{\max}) $\sim 176 \text{ см/с}^2$, для воздействий 8 и 8* баллов (по более жесткой оценке согласно п.2.2.6 СНиП II-7-81* $\sim 200 \text{ см/с}^2$);

- преобладающий период пиковых ускорений (Ta_{\max}) $\sim 0.2 \text{ с}$;

- эффективная длительность колебаний ($t_{0.5}$) $\sim 4 \text{ с}$.

При моделировании “удаленных” землетрясений:

- максимальное ускорение (a_{\max}) $\sim 50 \text{ см/с}^2$ (по более жесткой оценке $\sim 100 \text{ см/с}^2$);

- преобладающий период пиковых ускорений (Ta_{\max}) $\sim 1.0 \text{ с}$;

- эффективная длительность колебаний ($t_{0.5}$) $\sim 40 \text{ с}$.

Б. Выполнение лабораторных экспериментов с назначенными параметрами воздействий.

При лабораторном моделировании циклического нагружения образцов грунтов при заданных частоте f , количестве циклов N и величине циклических напряжений сдвига τ_d определялись:

- амплитуды циклических деформаций $A\varepsilon_d$,
- относительные осевые циклические деформации ε_d ;
- относительные поровые давления U/σ'_3 .

Результаты испытаний иллюстрируются диаграммами (рис. 2), причем в качестве примера приведены записи испытаний образца, претерпевшего разжижение при высоком уровне воздействия.

В соответствии с полученными авторами результатами сейсмологического анализа частота приложения нагрузки в приборах динамического трехосного сжатия составляла $f = 5.0$ Гц в течение $N = 20$ циклов, т.е. ~ 4 с (для моделирования

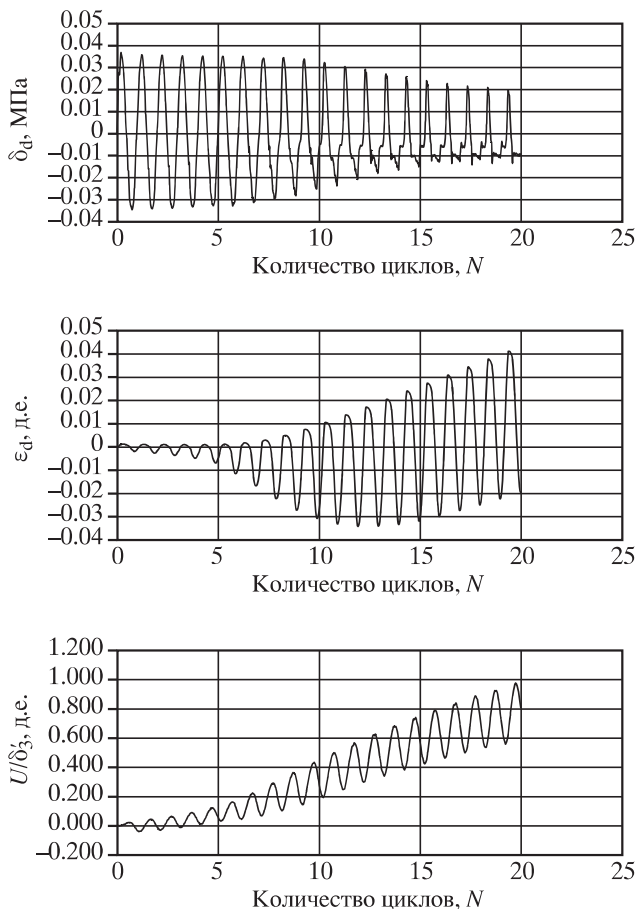


Рис. 2. Характерные диаграммы записей результатов экспериментов.

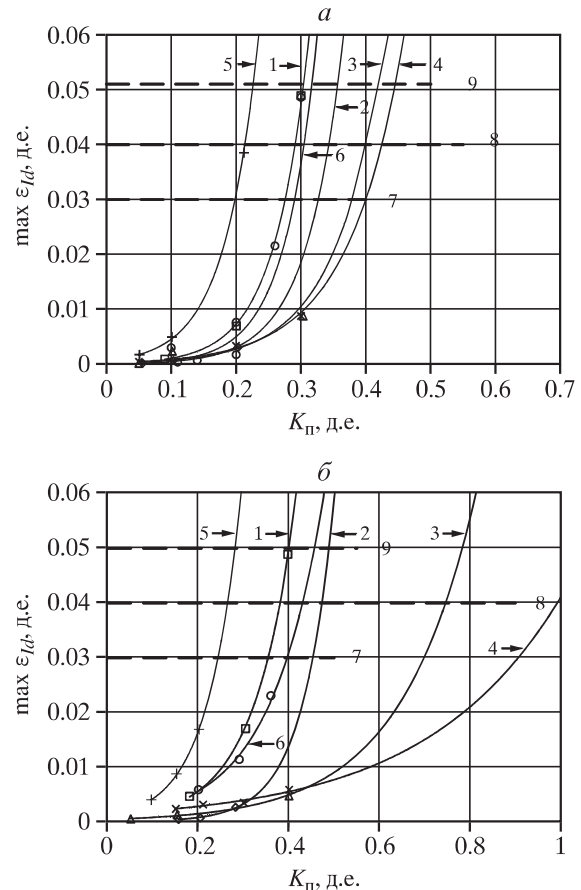


Рис. 3. Диаграммы обобщенных результатов моделирования воздействия: *а* – “удаленных” землетрясений ($K_0 \neq 1$); *б* – “местных” землетрясений ($K_0 \neq 1$). (1–6 – соответственно для ИГЭ 2–1, 2–2, 3, 4–1, 4–2 и 5; уровень относительных осевых деформаций при статическом разрушении для ИГЭ: 7 – 2–1; 8 – 3, 4–1, 5; 9 – 2–1 и 4–2).

“местных” землетрясений). Для моделирования “удаленных” землетрясений производилось нагружение с частотой $f = 1.0$ Гц, продолжающееся в течение 40 циклов, т.е. ~ 40 с.

Амплитуда осевых динамических напряжений σ_d задавалась величиной коэффициента перегрузки K_n , изменяющейся в диапазоне 0.05–0.60, и моделировала уровень относительных ускорений колебаний при землетрясениях

$$K_n = \frac{\sigma_d}{2 \cdot \sigma'_1} = \frac{a_{\max}}{g}.$$

Обобщенные результаты исследований в виде диаграмм представлены на рис. 3. На них отражены зависимости максимальных за время опыта относительных осевых динамических деформаций ($\max \varepsilon_{1d}$) от K_n для грунтов исследованных инженерно-геологических элементов (ИГЭ). В этих зависимостях уровень деформаций, соответствующих разрушению грунта при статичес-

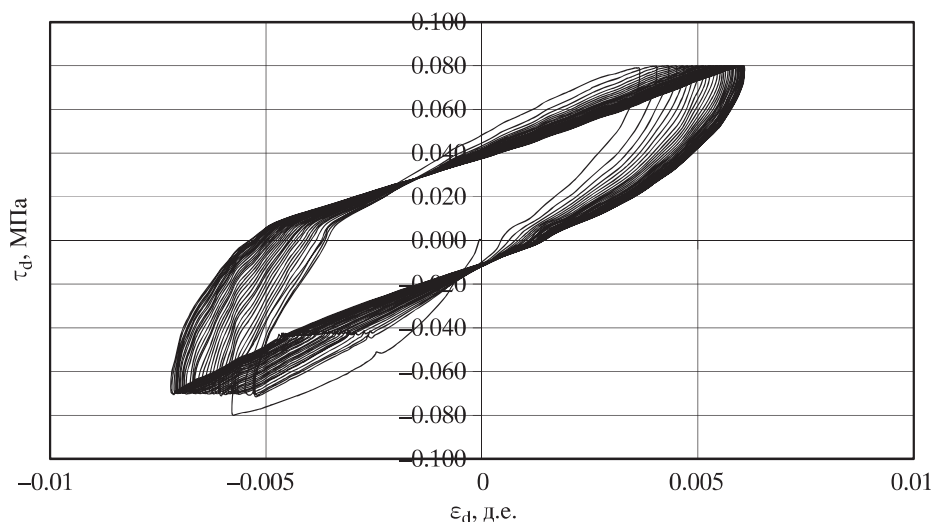


Рис. 4. Характерная диаграмма соотношения динамических напряжений сдвига и относительных динамических деформаций.

ком нагружении, принят критерием разрушения для циклических опытов. На графиках этот уровень показан горизонтальными пунктирными линиями соответственно для грунтов различных ИГЭ.

Таким образом, были выполнены серии циклических испытаний и на основе анализа их результатов получены значения предельных, разрушающих коэффициентов перегрузки K_n^* или относительных ускорений a_{\max}^*/g .

Выполненные эксперименты по циклическому сдвиговому деформированию образцов грунтов (при частоте $f = 1.0$ Гц, различных уровнях напряжения сдвига τ_d и динамических деформациях в диапазоне $\sim 10^{-5}$ – 10^{-2} д.е.), позволили получить данные, необходимые для расчетов динамического модуля сдвига грунтов G_d .

Основой для вычислений служили полученные в ходе экспериментальных исследований результаты, представляемые в виде диаграмм соотношений τ_d и ε_d (рис. 4).

В. Оценка возможности изменения механических свойств вплоть до разжижения водонасыщенных дисперсных грунтов при циклических нагрузках, моделирующих сейсмические воздействия различного уровня.

Динамическая (циклическая) прочность и деформируемость грунтов определяется совокупностью внешних (параметры воздействия) и внутренних факторов (состав, состояние и свойства грунтов). Поэтому при анализе необходимо учитывать, как инженерно-геологические свойства

элементов грунтовой толщи, так и уровень динамических (циклических) внешних воздействий.

Среди наиболее известных методик оценки сейсмостойчивости можно назвать следующие [9]:

- методику исторических аналогий;
- методику накопленных разрушений Донована;
- методику эквивалентного равномерного циклического нагружения Сиды и Идрисса.

Последняя наиболее часто применяется в международной практике [10]. Однако следует отметить, что лежащие в основе упомянутых методических подходов упрощенные способы расчетов имеют эмпирический характер, поэтому по мере накопления региональных данных возможно их совершенствование на основе ужесточения или смягчения критериев оценки.

В основе метода Сиды и Идрисса лежит сопоставление коэффициента напряжений (Stress Ratio)

$$SR = \frac{\tau_d}{\sigma'_3} = \frac{0.65 \cdot (a/g) \cdot \sigma'_1}{\sigma'_3}$$

с параметром $CRR_{7.5}$ (Cyclic Resistance Ratio), характеризующим разрушение грунта при воздействии с магнитудой 7.5. $CRR_{7.5}$ определяется на основе многих, разного рода корреляционных зависимостей, в основе которых лежат результаты стандартных пенетрационных испытаний SPT (Standard Penetration Tests).

Таблица 3. Максимальные значения относительных осевых динамических деформаций и предельных уровней K_n^* во время опытов

Номер ИГЭ	Характеристика грунтов	Значения характеристик для “местных” и “удаленных” землетрясений			K_0	Прогнозируемая $\max \varepsilon_{1d}, \%$	Предельный уровень K_n^* или a_{\max}^*/g	Коэффициент безопасности, SF, д.е.	Коэффициент безопасности, SF, д.е. (по более жесткой оценке a_{\max} , принятой согласно п.2.2.6 СНИП-II-7-81*)		
		a_{\max}/g	Частота, f , Гц	Число циклов, N							
для “удаленных” землетрясений											
2-1	Суглинки и глины мягкопластичные	0.05	1.0	40	1	5.9E-03	0.34	6.8	3.4		
					$\neq 1$	4.6E-02	0.30	6.0	3.0		
2-2	Супеси текучие				1	7.7E-03	0.35	7.0	3.5		
					$\neq 1$	2.2E-02	0.33	6.6	3.3		
3 (3-1 и 3-2)	Пески пылеватые с прослойками супеси пластичной				1	1.1E-02	0.49	9.8	4.9		
					$\neq 1$	3.9E-02	0.40	8.0	4.0		
4-1	Пески пылеватые				1	1.1E-02	0.51	10.2	5.1		
					$\neq 1$	5.3E-02	0.43	8.6	4.3		
					4-2	Супеси пластичные с прослойками песка пылеватого и суглинка мягко- и тугопластичного	1	1.5E-02	0.35	7.0	3.5
							$\neq 1$	1.8E-01	0.23	4.6	2.3
5	Глины и суглинки мягко- и текучепластичные	1	1.4E-01	0.29	5.8	2.9					
		$\neq 1$	2.6E-02	0.30	6.0	3.0					
для “местных” землетрясений											
2-1	Суглинки и глины мягкопластичные	0.176	5.0	20	1	2.2E-02	0.41	2.3	2.1		
					$\neq 1$	4.4E-01	0.40	2.2	2.0		
2-2	Супеси текучие				1	1.4E-02	0.41	2.3	2.1		
					$\neq 1$	5.5E-02	0.45	2.6	2.3		
3 (3-1 и 3-2)	Пески пылеватые с прослойками супеси пластичной				1	8.9E-02	0.84	4.8	4.2		
					$\neq 1$	1.3E-01	0.75	4.3	3.8		
4-1	Пески пылеватые				1	8.6E-02	0.93	5.3	4.7		
					$\neq 1$	2.6E-01	1.00	5.7	5.0		
					4-2	Супеси пластичные с прослойками песка пылеватого и суглинка мягко- и тугопластичного	1	1.1E-01	0.39	2.2	2.0
							$\neq 1$	1.2E-00	0.28	1.6	1.4
5	Глины и суглинки мягко- и текучепластичные	1	5.5E-01	0.35	2.0	1.8					
		$\neq 1$	4.6E-01	0.43	2.4	2.2					

В связи с этим более достоверным следует признать непосредственное экспериментальное определение величины предельных динамических напряжений в опытах, при частоте f , ускорении a_{\max} и длительности воздействия t , соответствующих реальной магнитуде. Предлагаемый методичес-

кий подход заключается в сопоставлении величины экспериментально задаваемого коэффициента перегрузки K_n , приводящего к разрушению или разжижению (K_n^*), с величиной рассчитанного по сейсмологическим данным относительного ускорения колебаний a_{\max}/g при землетрясении.

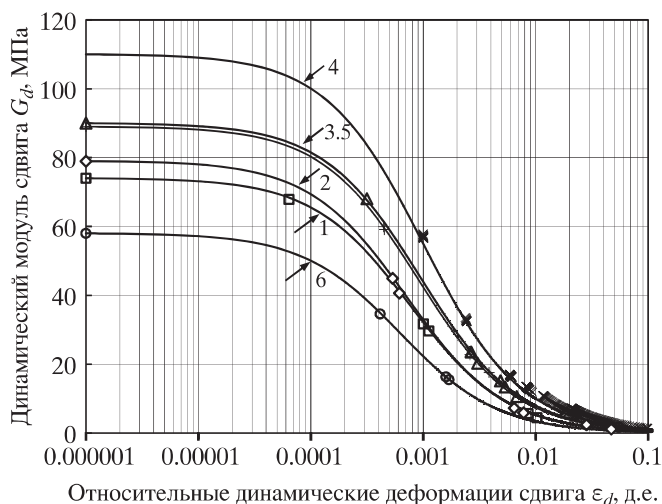


Рис. 5. Диаграммы изменения значений динамического модуля сдвига для ИГЭ: 1 – 2-1; 2 – 2-2; 3 – 3; 4 – 4-1; 5 – 4-2; 6 – 5.

Сейсмоустойчивость грунта к разрушению или разжижению определяется выполнением условия: $K_n^* > a_{max}/g$ или величиной коэффициента безопасности $SF = \frac{K_n^*}{K_n} > 1$.

При этом величина K_n принималась и задавалась в опытах по наиболее жесткому критерию:

$$K_n = \frac{\tau_d}{\sigma'_1} = a_{max}/g.$$

Максимальные за время опыта значения относительных осевых динамических деформаций ($max \epsilon_{1d}$) при уровне возможных воздействий от “удаленных” ($f = 1.0$ Гц; $N = 40$) и “местных” ($f = 5.0$ Гц; $N = 20$) землетрясений, а также значения предельных уровней K_n^* или относительных ускорений колебаний a_{max}^*/g сведены в табл. 3.

Испытания, моделирующие сейсмические воздействия с принятыми параметрами ($f = 1.0 - 5.0$ Гц; $a_{max}/g = 0.05 - 0.176$; $N = 20 - 40$ циклов), показали отсутствие разрушения образцов грунтов. Максимальные осевые деформации при этом не превышают 0.6–1.2%.

Разрушение образцов грунтов происходит при $a_{max}^*/g = 0.28 - 1.00$ в зависимости от характеристик грунтов. Наиболее чувствительными к воздействиям оказались грунты ИГЭ 2-1, 2-2, 4-2 и 5, представленные супесями текучими и пластичными, а также суглинками мягкопластичными ($K_n^* = 0.28 - 0.45$). Наиболее устойчивы грунты ИГЭ-3 (пески пылеватые с прослоями супеси пластичной) и ИГЭ-4-1 (пески пылеватые) ($K_n^* = 0.75 - 1.00$).

Однако в целом, для грунтов всех изученных инженерно-геологических элементов коэффи-

циент безопасности SF превышает 1, варьируя в пределах 4.6–10.2 (при воздействии “удаленных” землетрясений) и 1.6–5.7 (при воздействии “местных” землетрясений).

Таким образом, можно говорить о значительном запасе прочности грунтового основания площадки к воздействиям сейсмического характера. Следует учитывать лишь возможность проявления дополнительных относительных осевых деформаций грунтов, по данным экспериментов достигающих 0.6–1.2%. При этом величина накапливаемого в динамических опытах относительного порового давления U/σ'_3 не превышает значений 0.02–0.05, в единичных случаях составляя 0.06–0.14, что свидетельствует об отсутствии возможности разжижения грунтов.

Значения динамических модулей сдвига грунтов G_d были получены при относительных динамических деформациях, изменяющихся в широком диапазоне от $\sim 10^{-5}$ до $\sim 10^{-2}$ д.е., задаваемых в опытах при различных уровнях напряжения сдвига и частоте, характерной для наиболее длительных “удаленных” землетрясений. Обобщенные значения результатов экспериментов для грунтов исследованных инженерно-геологических элементов представлены на рис. 5, 6.

Как видно из диаграммы, приведенной на рис. 6, значения нормированного модуля сдвига G_d/G_{dmax} в зависимости от величины относительной динамической деформации сдвига ϵ_d изменяются в нешироких пределах.

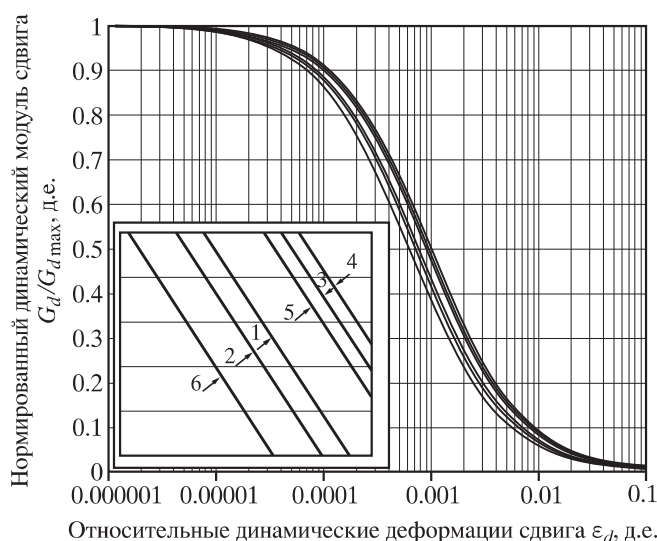


Рис. 6. Диаграммы изменения значений относительного динамического модуля сдвига G_d/G_{dmax} для ИГЭ: 1 – 2-1; 2 – 2-2; 3 – 3; 4 – 4-1; 5 – 4-2; 6 – 5.

Зависимости динамического модуля сдвига, а также нормализованного модуля сдвига от величины относительной динамической деформации сдвига могут быть использованы для оценки поведения системы сооружение-грунт при различных условиях нагружения и для расчета собственных частот колебаний систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования посвящены изучению важной проблемы влияния на прочность и деформируемость грунтов циклических нагрузок сейсмического характера.

Предлагается методология оценки сейсмостойчивости грунтов, содержащая следующие основные аспекты:

– анализ сейсмологических данных, расчет ожидаемых параметров амплитудно-частотного спектра и уточнение их значений на основе сейсмического микрорайонирования, учитывающего грунтовые условия площадки;

– выполнение экспериментальных исследований представительных образцов грунтов в условиях, моделирующих природное напряженно-деформированное состояние и циклические нагрузки с заданными амплитудно-частотными характеристиками;

– анализ зависимостей деформируемости грунтов от величины коэффициента перегрузки K_n (или коэффициента напряжений SR), оценка предельных значений K_n^* и коэффициента безопасности $SF = \frac{K_n}{K_n^*} < 1$, как условия потери сейсмостойчивости грунтов.

Последовательность шагов предлагаемого методического подхода и результаты его практического применения показаны на примере оценки сейсмостойчивости грунтового основания площадки центрального района Северного Каспия. На основе анализа сейсмологических данных с учетом грунтовых условий определены два спектра возможных воздействий, характеризующиеся частотами 5.0 и 1.0 Гц, длительностью 4 с и 40 с, максимальными значениями ускорений ~ 176 см/с² и ~ 50 см/с². Анализ результатов испытаний, моделирующих сейсмические воздействия с заданными расчетными параметрами, показал, что коэффициент безопасности для грунтов выделенных инженерно-геологических элементов (ИГЭ), превышает 1, варьируясь в пределах $SF = 1.6–10.2$. Это свидетельствует о достаточном запасе

прочности грунтов и их сейсмостойчивости. Контроль прироста порового давления ΔU в испытаниях и величины его отношения к давлению обжатия σ'_3 , составляющие $\Delta U/\sigma'_3 = 0.06–0.14$ д.е., свидетельствует об отсутствии возможности разжижения грунтов. Величина дополнительных относительных осевых деформаций при воздействиях составляет 0.6–1.2%.

В ходе циклических сдвиговых испытаний с заданными расчетными параметрами сеймовоздействий получены значения динамического модуля сдвига G_d и установлен характер их распределения в зависимости от величины относительных динамических деформаций сдвига в диапазоне $\sim 10^{-5}–10^{-2}$ д.е.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антикаев Ф.Ф. Сильные движения грунта при землетрясениях (сейсмические воздействия) // Автореф. дис....докт. физ.-мат. наук. М.: ОИФЗ РАН, 2001. 47 с.
2. Иванов П.Л., Кутергин В.Н. и др. Руководящий нормативный документ: Определение прочностных и деформационных свойств немерзлых песчаных и глинистых грунтов при динамических воздействиях. М.: Миннефтегазпром, 1991. 60 с.
3. СП 11-114-2004. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства нефтегазопромысловых сооружений. М.: ФГУП «ПНИИИС» Госстроя России, 2004. 87 с.
4. СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах. М.: Госстрой России, 2003. 49 с.
5. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.
6. ASTM D 3999–91. Standard Test Method for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus // <http://www.astm.org/Standards/D3999.htm>.
7. ASTM D 5311–2002. Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil // <http://www.astm.org/Standards/D5311.htm>.
8. Eide O., Andersen K.H. Foundation engineering for gravity structures in the Northern North Sea // Norwegian Geotechnical Institute, Publication 154, 1984. P. 1–48.
9. Valera J.E., Donovan N.C. Soil liquefaction procedures – a review // J. of the Geotechnical Engineering Division. ASCE. 1977. V. 103. № GT6. P. 607–625.
10. Youd T.L., Idriss I.M. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and

1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils // *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. April 2001. V. 127. №. 4. P. 297–313.

REFERENCES

1. Aptikaev, F.F. *Sil'nye dvizheniya grunta pri zemletryaseniyah (seismicheskie vozdeistviya)*. Avtoreferat diss. dokt. fiz.-mat. nauk. [Strong soil movements during earthquakes (seismic effects). Dr. phys.-math sci. diss.]. Moscow, OIFZ RAN, 2001, 47 p.
2. Ivanov, P.L., Kutergin V.N., et al. *Rukovodyashchii normativnyi dokument: Opredelenie prochnostnykh i deformatsionnykh svoystv nemezlykh peschanykh i glinistykh gruntov pri dinamicheskikh vozdeistviyakh* [Governing regulations: Determination of strength and deformation properties of nonfrozen sandy and clayey soils under dynamic loading]. Moscow, Minneftegazprom, 1991. 60 p.
3. *SP 11-114-2004. Inzhenernye izyskaniya na kontinental'nom shel'fe dlya stroitel'stva neftegazopromyslovykh sooruzhenii* [Code of Rules 11-114-2004. Engineering survey on the continental shelf for the construction of oil and gas production facilities]. Moscow, FGUP "PNIIS" Gosstroya Rossii, 2004. 87 p.
4. *SNiP II-7-81*. Stroitel'stvo v seismicheskikh raionakh* [Code of Rules and Regulations II-7-81*. Construction in seismic regions]. Moscow, Gosstroj Rossii. 2003. 49 p.
5. Ulomov, V.I. and Shumilina, L.S. *Komplekt kart obshchego seismicheskogo raionirovaniya territorii Rossiiskoj Federatsii – OSR-97. Masshtab 1:8000000. Ob'yasnitel'naja zapiska* [Complete maps of general seismic zoning of the Russian Federation territory SRF-97. Scale 1: 8 000 000. Explanatory note]. Moscow. OIFZ RAN, 1999. 57 p.
6. ASTM D 3999-91. Standard Test Method for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus // <http://www.astm.org/Standards/D3999.htm>.
7. ASTM D 5311-2002. Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil// <http://www.astm.org/Standards/D5311.htm>.
8. Eide, O. and Andersen, K.H. Foundation engineering for gravity structures in the Northern North Sea. *Norwegian Geotechnical Institute*, Publication 154, 1984, pp.1–48.
9. Valera, J.E., and Donovan, N.C. Soil liquefaction procedures – a review. *J. of the Geotechnical Engineering Division*. ASCE, 1977, vol. 103, no. GT6, pp. 607–625.
10. Youd, T.L., and Idriss, I.M. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. April 2001, vol. 127, no. 4, pp. 297–313.

THE BASIC ASPECTS OF METHODOICAL APPROACH TO ASSESSING SEISMIC RESISTANCE OF SOILS

V. N. Kutergin, V. V. Sevost'yanov, K. V. Pankov, R. G. Kal'bergenov, L. V. Grigor'eva

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences
Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia. E-mail: vank@bk.ru*

The study of stress-strain behavior of soils is an important issue in earthquake protection and off-shore engineering. This paper aims to develop the methodology for estimating the soil seismic resistance, the influence of seismic loads on the strength and deformation properties of soils. The objects of research were the soil samples from the central part of North Caspian shelf area which tend to become the basis of offshore oil and gas hydrotechnical structures. Triaxial and shear amplitude-controlled cyclic tests were conducted for different soil types using alternate loading.

The methodical approach to the estimation of soil seismic resistance was developed; it consists of three main stages. (1) Analysis of the seismic data, determination of the amplitude-frequency spectrum parameters for laboratory research and specification of parameters based on local soil conditions and seismic microzoning data. (2) Carrying out laboratory research on soil samples simulating in-situ stress-strain condition of soils and cyclic test with specified amplitude-frequency parameters. (3) Analysis of soil stress-strain behavior dependences on the overload factor K_n (or stress ratio SR), calculation of the ultimate overload factor K_n^* , and of the safety factor SF based on the comparison of accepted and ultimate effect levels.

In general, the methodological concept consists in comparing experimentally determined overload factor K_n , which can lead to liquefaction or destruction of soil (K_n^*), and relative acceleration of oscillation during earthquakes a_{\max}/g calculated using seismological data.

Results of practical application of the developed methodological approach can be illustrated by the example of estimating the seismic resistance of grounds in the North Caspian shelf area. Two possible spectra of cyclic loads, characterized by frequencies of 5.0 and 1.0 Hz, duration of 4 sec and 40 sec, and the maximum acceleration $\sim 176 \text{ cm/sec}^2$ and $\sim 50 \text{ cm/sec}^2$, were calculated proceeding from seismological data, soil conditions, and adopted overload ratio (K_n) at 0.05 and 0.176.

Experimental studies of soil samples with the specified cyclic loading parameters permitted us to estimate the relationship between the deformation properties of some soils and increasing overload ratio (K_n) up to its ultimate value (K_n^*). Comparison of the accepted and ultimate values of overload ratio attested to a sufficient safety factor $SF = K_n^*/K_n = 1.6\text{--}10.2$. An increment of the pore pressure ΔU and its value against lateral pressure ($\sigma'_3 = 0.06\text{--}0.14$ fraction units) points to the absence of liquefaction. Extra axial strain was equal to 0.6–1.2%. The cyclic tests permitted us to estimate the value of the shear modulus G_d and relationship of the shear modulus and the strain level from 10^{-5} to 10^{-2} fraction units.

Keywords: *seismic resistance, shelf ground, cyclic tests, loading parameters, overload ratio, safety coefficient.*