

УДК 624.131

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ГРУНТОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ШТОРМОВЫХ ВОЛН НА СООРУЖЕНИЕ

© 2015 г. В. Н. Кутергин*, В. Б. Манукин**, К. В. Панков*, Р. Г. Кальбергенов*,
Ф. С. Карпенко*

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия. E-mail: vank@bk.ru
**Институт физики Земли РАН, ул. Б. Грузинская, 10, Москва, 123995 Россия.

Поступила в редакцию 18.12.2014 г.

Комплексная оценка возможной деградации грунтов при воздействии длительных циклических нагрузок от штормовых волн включает: анализ гидрологических данных, расчет ожидаемых параметров амплитудно-частотного спектра штормовых волн и соответствующих усилий сдвига; прогноз снижения прочности на основе экспериментов, выполненных с рассчитанными параметрами волн и нагрузок; итоговый анализ поведения грунтов с учетом распределения волн различной высоты во времени в течение действия шторма принятой продолжительности. Приведены результаты оценки устойчивости грунтовой толщи основания площадки на шельфе северной части Каспийского моря.

Ключевые слова: прочность, штормовые волны, грунты шельфа, циклические испытания, параметры воздействия.

В настоящее время широко ведутся работы по разведке и освоению месторождений природного сырья на шельфе морей при помощи буровых и эксплуатационных платформ, опирающихся на грунт, так называемых гравитационных платформ.

Грунтовые основания платформ подвергаются значительным дополнительным циклическим воздействиям, в частности, от действия на эти гидротехнические сооружения штормовых волн. Изучение поведения водонасыщенных грунтов шельфа при длительном циклическом нагружении, моделирующем воздействие штормовых волн, крайне важно для проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений.

Существующая практика расчета устойчивости подобных сооружений не учитывает изменение свойств грунтов оснований при действии реальных циклических нагрузок. Эти изменения будем характеризовать в дальнейшем термином “деградация” (лат. degradation), означающим снижение характеристик какого-либо объекта вследствие внешнего воздействия.

Методический подход и оценка изменения прочностных характеристик грунтов основания

гравитационных платформ при циклических воздействиях от действия штормовых волн излагаются в настоящей статье на основании работ, выполненных Лабораторией исследования состава и свойств грунтов ИГЭ РАН.

Методический подход включает:

- оценку вероятных параметров воздействий штормовых волн;
- лабораторные эксперименты по испытаниям образцов грунтов с заданными параметрами напряженного состояния и циклических нагрузок;
- анализ возможного изменения прочности грунтов;
- оценку поведения грунтов в условиях циклического нагружения при действии 12-часового шторма.

Под условиями нагружения в целом понимают параметры, характеризующие ход процесса или испытания. Среди параметров, определяющих условия циклического нагружения, выделяют: период T (частоту f) действия нагрузки, амплитуду напряжений A_{-cy} или перемещений A_{ey} , время t (число циклов нагружения N).

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРИБОРЫ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Объект исследований – грунтовая толща площадки месторождения природного сырья, расположенной в северной части Каспийского моря. Строение грунтового массива основания представлено в табл. 1. Для исследования влияния циклических воздействий на грунты основания площадки были выбраны представительные образцы из пяти инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Образцы отбирались в тонкостенные стаканы из нержавеющей стали и имели размеры: диаметр 8.9–10.2 см и длину ~100 см. Полученные в результате статистической обработки массивов данных характеристики физических свойств, статической прочности и деформируемости грунтов изученных инженерно-геологических элементов представлены в табл. 2. Приведенные показатели приняты в качестве исходных для последующей оценки их изменения в результате действия знакопеременных циклических нагрузок.

В качестве объекта, испытывающего воздействия штормовых волн, рассматривается сооружение, представляющее собой блок колонного типа, опирающийся на грунт (рис. 1).

Параметры напряженно-деформированного состояния, характеризующие условия проведения экспериментов, были приняты, исходя из сведений о массогабаритных характеристиках соору-

Таблица 1. Краткая характеристика разреза грунтового основания

Стратиграфическая позиция	№ ИГЭ	Глубина залегания подошвы от дна, м	Наименование грунтов
III _{hv}	III _{hv2}	2	Супеси текучие и пластичные
		3	Пески пылеватые
		4-1	Суглинки текучие, текучепластичные и тугопластичные с прослойками супеси пластичной
	4-2	Супеси пластичные с прослойками песка пылеватого	
	III _{hv1}	5	Суглинок и глина пылеватые мягкопластичные, известковистые

Таблица 2. Исходные характеристики физико-механических свойств грунтов

Номер ИГЭ	Поддонная глубина, м	Характеристика грунтов	Плотность, г/см ³	Влажность, %	Коэффициент пористости, д.с.	Пластичность, %			Прочность	
						W _L	W _P	I _P	C, кПа	φ, град
2	0.6–2.9	Супеси текучие и пластичные	2.01	24.0	0.670	22.0	16.8	5.2	7	30
3	3.1–8.4	Пески пылеватые	1.96	25.2	0.724	33.1	21.7	11.4	8	34
4-1	8.1–13.3	Суглинки текучие, текучепластичные и тугопластичные с прослойками супеси пластичной	1.93	31.0	0.846	28.7	23.4	5.3	21	23
4-2	9.1–14.9	Супеси пластичные с прослойками песка пылеватого	1.94	27.3	0.772	36.6	21.9	14.7	13	32
5	14.7–16.6	Суглинки и глины мягкопластичные	1.90	29.8	0.855				21	21

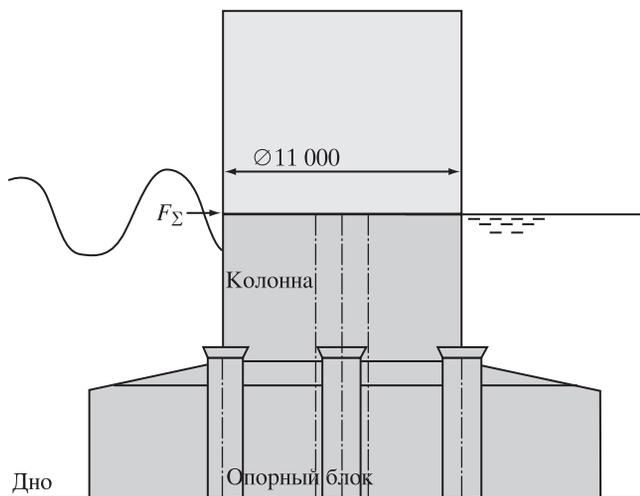


Рис. 1. Схема опорного блока колонного типа.

жения, а также данных об инженерно-геологических свойствах грунтов (табл. 3).

Для выполнения лабораторных экспериментов использовался прибор циклического сдвига ПЦС-3, оснащенный пульсаторами, генерирующими осевые вертикальные и сдвигающие горизонтальные циклические нагрузки.

Сдвиговые испытания при циклическом нагружении на фоне действующих статических нагрузок, моделирующих природное напряженно-деформированное состояние грунтов, проводились на испытательной установке с программируемым управлением и автоматической регистрацией параметров эксперимента.

Для оценки изменения прочности грунтов при циклических нагрузках, моделирующих воздействие штормовых волн, выполняли консолидированно-недренированные циклические сдвиговые испытания образцов. Методика испытаний аналогична подходу, используемому в методических

разработках Норвежского геотехнического института (NGI) [2], ее суть заключается в определении числа циклов нагружения (N), необходимого для разрушения грунта при различных соотношениях статических и динамических напряжений.

Образцы грунтов диаметром 71.4 мм и высотой 35.0 мм вырезали из монолитов при помощи цилиндра с режущим краем, заключали в резиновую оболочку и помещали между верхним и нижним штампами прибора ПЦС-3. Предварительно определяли стандартную статическую прочность грунта (статическое предельное напряжение сдвига τ_s^*). Подготовка к испытаниям заключалась в водонасыщении образцов в условиях действия осевых нагрузок $\sigma_{1эфф}$, соответствующих условиям залегания грунта в массиве и действия нагрузок от сооружения. Испытания проводили по консолидированно-недренированной схеме при скорости нагружения, позволяющей достигнуть разрушения в течение 2-х часов. Предельное напряжение сдвига τ_s^* принималось равным касательному напряжению, приложение которого вызывало резкий рост сдвиговых деформаций. Соответствующие τ_s^* относительные деформации сдвига ϵ_s учитывались впоследствии в циклических опытах в качестве критерия разрушения.

Аналогичные процедуры предварительной подготовки, водонасыщения и консолидации при осевом давлении $\sigma_{1эфф}$ применяли также для образцов грунтов, подвергаемых впоследствии циклическому нагружению. Оно выполнялось в недренированных условиях, путем приложения горизонтального циклического воздействия заданной относительной амплитуды $A_{\tau_{cy}} = \tau_{cy}/\tau_s^*$, при этом фиксировалось число циклов нагружения N^* , достаточное для преодоления прочности грунта.

Другие, идентичные предыдущим образцы подвергали испытаниям при иных уровнях нор-

Таблица 3. Характеристики напряженного состояния грунтового массива

Номер ИГЭ	Поддонная глубина, м	Характеристика грунтов	Напряжения по оси сооружения $\sigma_{1эфф}$, МПа	Предельные статические напряжения сдвига, τ_s^* , МПа
2	0.6–2.9	Супеси текучие и пластичные	0.073	0.049
3	3.1–8.4	Пески пылеватые	0.121	0.089
4-1	8.1–13.3	Суглинки текучие, текучепластичные и тугопластичные с прослойками супеси пластичной	0.155	0.087
4-2	9.1–14.9	Супеси пластичные с прослойками песка пылеватого	0.173	0.118
5	14.7–16.6	Суглинки и глины мягкопластичные	0.180	0.088

мализованных циклических напряжений τ_{cy}/τ_s^* , величину которых выбирали из расчета разрушения образца в пределах 10^4 циклов.

В ходе опытов определяли осевые ε_1 и сдвиговые деформации ε_{cy} , контролировали напряжения $\sigma_{1эфф}$, τ_{cy} и давление в поровой воде ΔU .

Основными критериями преодоления прочности грунта считали:

- достижение амплитудных значений деформаций сдвига, характерных для разрушения идентичного грунта при статических испытаниях;
- рост отношения порового давления к эффективной осевой нагрузке $\Delta U/\sigma_{1эфф}$ до значений более 0.9 д.е.

Изменение прочностных характеристик грунтов при циклических нагрузках выражалось в виде *кривых усталостной прочности* – диаграмм соотношений числа циклов (N) или времени t , необходимых для разрушения, и относительной амплитуды сдвиговых напряжений τ_{cy}/τ_s^* . Использование этих диаграмм позволяет оценить несущую способность грунтового основания для различных сценариев взаимодействия сооружения с волнами на период всего срока эксплуатации объекта.

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ШТОРМОВЫХ ВОЛН

В целом природные циклические нагрузки имеют преимущественно стохастический характер с широким спектральным составом. Частота воздействия, характерная для волновых нагрузок (в диапазоне 0.1–10.0 Гц), по мнению многих исследователей, не оказывает (особенно для песков) существенного влияния на отклик грунта, однако, технически, в опытах без труда реализуется любое ее значение. При моделировании амплитуды воздействия допускаются существенные упрощения – нерегулярный характер приложения нагрузок аппроксимируется периодическими гармоническими силовыми воздействиями заданной амплитуды и продолжительности.

Циклические воздействия от штормовых волн могут существенно изменить прочностные и деформационные свойства грунтов основания морских нефтегазопромысловых сооружений. Оценка значений параметров воздействий и учет их при лабораторном моделировании особенно важны для исследований влияния циклических нагрузок на прочность и деформируемость грунтов.

В соответствии с гидродинамической теорией движения волн вводится потенциал скорости φ , представляющий собой функцию, производная которой по направлению определяет скорость движения частиц жидкости в этом направлении:

$$\varphi = \frac{hg}{3\omega} f(z) \sin(kx - \omega t), \quad (1)$$

где h – превышение вершины волны над подошвой, ω – волновая частота, k – волновое число: $k = 2 \cdot \pi/\lambda$, λ – длина волны, z – расстояние от поверхности воды, g – ускорение свободного падения, t – время.

Для случая $H \geq \lambda/2$ (H – глубина акватории): $f(z) = e^{kz}$.

Скорость волны $c = \omega/k$; $\omega = \sqrt{kg}$ и $c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$.

Продифференцировав (1), получим скорости частиц:

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{\omega h}{2} e^{kz} \cos(kx - \omega t), \\ V_z &= \frac{\omega h}{2} e^{kz} \sin(kx - \omega t). \end{aligned} \quad (2)$$

Согласно [1], ускорение $\vec{a} = (\vec{V}\vec{\nabla})\vec{V} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$, откуда

$$a_x = V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_x}{\partial t}.$$

Учитывая (2), $V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} = -V_x \frac{\partial V_x}{\partial z}$, тогда для ускорения a_x получим выражение

$$a_x = \frac{h\omega^2}{2} e^{kz} \sin(kx - \omega t). \quad (3)$$

Расчет волновой нагрузки на цилиндрическую опору

На элемент конструкции объема U и площади A единицы длины, перпендикулярной скорости волны, с гидродинамическим коэффициентом сопротивления C_D и коэффициентом инерции C_M действует сила:

$$F = C_D \cdot q_D \cdot A + C_M \cdot q_A \cdot U = F_1 + F_2,$$

где F_1 – динамическая и F_2 – инерционная составляющие силы; $q_D = \frac{\rho}{2} |V| V$ (ρ – плотность воды, V – скорость воды, направленная перпендикулярно рассматриваемой конструкции); $q_A = \rho \cdot a_D$ (a_D – ускорение); для опоры цилиндрической формы $A = D$ (D – диаметр опоры).

В случае, если число Рейнольдса $Re > 10^{-5}$ (в рассматриваемом случае $Re \approx 10^{-4}$), $C_D \approx 0.7$; $C_M \approx 1.5$.

Суммарная амплитуда силы, действующая на единицу длины опоры (мажорирующая оценка):

$$F(z) \approx \frac{\rho}{8} e^{kz} \omega^2 h D \sqrt{(0.5 e^{2kz} h^2 + 2.25 \lambda^2)}. \quad (4)$$

Общая величина амплитуды силы, действующей на опору, определяется из соотношения:

$$F_{\Sigma} = \int_{-H}^0 F(z) dz.$$

Для расчетов амплитуды горизонтальной силы взяты значения параметров морских волн (амплитуды, периода, длины волны), полученные по результатам анализа гидрометеорологических данных. Средние длины волн (λ_{cp}) составляют для акватории площадки 45.1–65.7 м.

Поскольку оценки, приведенные выше, получены для случая $H \geq \lambda/2$, то они справедливы для длин волн до ~ 35 м, так как глубины моря в Северном Каспии $H \approx 14$ –17 м.

Для более высоких значений периодов в формуле (1) необходимо использовать:

$$f(z) = \frac{ch[k(z+H)]}{ch(kH)}.$$

Однако, как показали расчеты, для проведения мажорирующих оценок силового воздействия волн на опоры можно воспользоваться формулой (4). При этом, при используемых заданных значениях λ и H ошибка в значении силы не превышает 10%.

Согласно гидрометеорологическим данным, для района площадки экстремальная высота волны 0.1%-ной обеспеченности повторяемостью 1 раз в 100 лет составляет $h = 7.1$ м. Для волны с амплитудой $h = 7.1$ м, $T = 7.9$ с и при диаметре опоры $D = 11.0$ м оценка $F_{\Sigma} \approx 7.76 \cdot 10^6$ Н или 776.0 т. Для волны с максимальной амплитудой $h = 5.8$ м и $T = 7.4$ с: $F_{\Sigma} \approx 5.18 \cdot 10^6$ Н или 517.8 т; для волн со средней амплитудой $h = 2.3$ м и $T = 7$ с: $F_{\Sigma} \approx 8.14 \cdot 10^5$ Н или 81.4 т.

Таким образом, для действия волновой нагрузки оценка максимальной амплитуды напряжения сдвига грунта в основании опоры (с площадью 380 м²) дает значение $\tau_{cy} \approx 0.013$ МПа; для экстремального расчетного случая – $\tau_{cy} \approx 0.020$ МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка влияния амплитуды и частоты воздействий штормовых волн

Консолидированно-недренированные циклические сдвиговые испытания образцов грунтов выполнялись при частоте $f = 0.125$ Гц, т.е. для периода $T = 7.9$ с, характерного для волн экстремальной высоты.

Уровень циклической нагрузки выражался в виде нормированной величины τ_{cy}/τ_s^* , в которой τ_{cy} представляет собой значение амплитуды циклического напряжения сдвига, а τ_s^* – стандартную прочность на сдвиг, полученную в ходе статического испытания.

По результатам испытаний, зависимости циклических деформаций сдвига от относительной амплитуды циклических нагрузок τ_{cy}/τ_s^* описываются степенной функцией, параметры которой определяются длительностью воздействия (рис. 2).

Характерные кривые усталостной прочности, полученные для грунтов ИГЭ-5, приведены на рис. 3. Из графиков видно, что при длительном знакопеременном циклическом воздействии прочность грунта уменьшается.

Для анализа влияния частоты воздействий f на поведение грунтов при построении диаграммы для суглинка мягкопластичного (ИГЭ-5) (см. рис. 3) использовались также результаты испытаний, моделирующих другие виды внешних воздействий и выполненных с частотами 0.66 и 0.8 Гц. Наиболее значительно прочность снижается при уменьшении частоты воздействия. Это наглядно иллюстрируется зависимостями, приведенными на рис. 4. При одинаковом количестве циклов N наибольшая деградация прочности отмечается при наименьшей в опытах частоте 0.125 Гц. По мере увеличения числа циклов до 10 000 эти отличия нивелируются.

Однако, если выразить снижение прочности в зависимости от времени t , то все экспериментальные точки ложатся на одну кривую (рис. 5). Из графика нетрудно видеть, что при изменении периода нагружения от 7.9 до 1.25 с значения времени до разрушения (t^*) оказываются близкими, т.е. частота приложения циклической нагрузки в диапазоне $f = 0.125$ –0.8 Гц не оказывает влияния на конечный результат снижения циклической прочности грунтов. Это позволяет сделать вы-

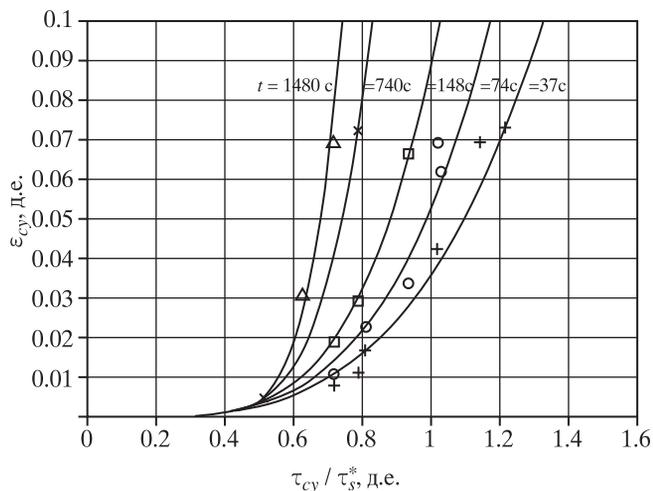


Рис. 2. Зависимости циклических деформаций сдвига ε_{cy} от относительной амплитуды циклических напряжений τ_{cy}/τ_s^* для грунтов ИГЭ-5 при различной длительности испытаний.

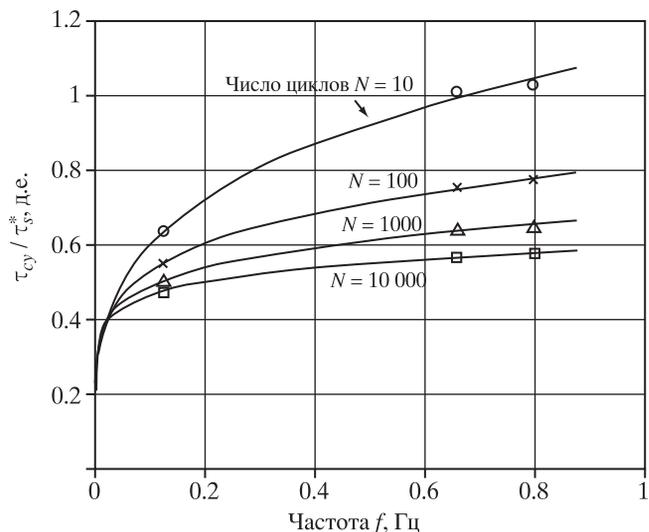


Рис. 4. Зависимость нормированной циклической прочности τ_{cy}/τ_s^* от частоты нагружения f .

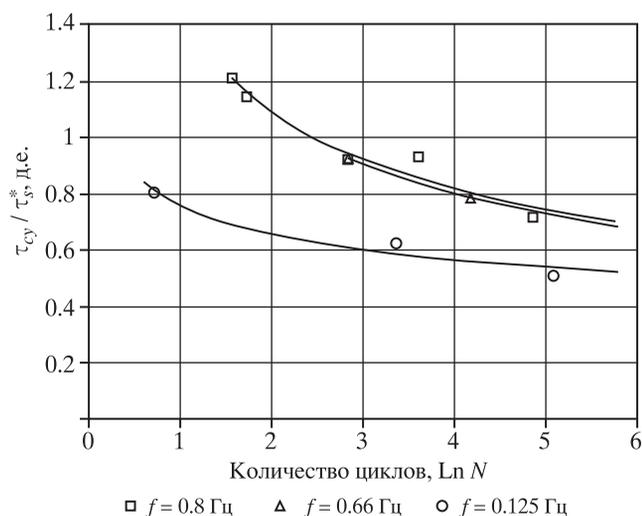


Рис. 3. Диаграмма соотношения числа циклов нагружения N , необходимого для разрушения грунта, и величины нормированной прочности τ_{cy}/τ_s^* .

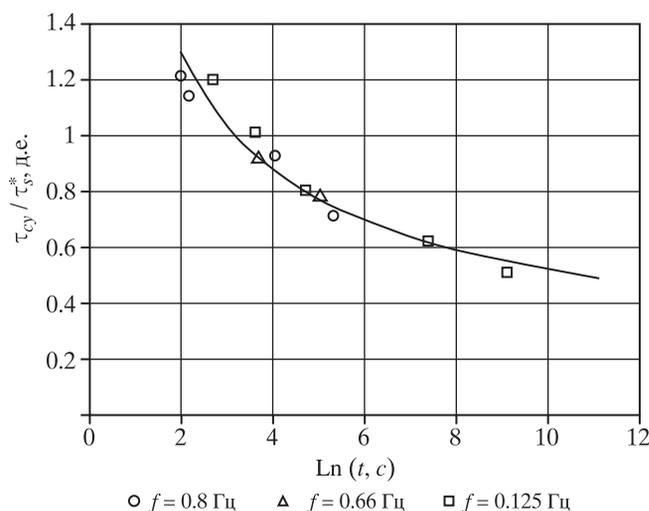


Рис. 5. Зависимость нормированной циклической прочности τ_{cy}/τ_s^* от длительности нагружения t для грунтов ИГЭ-5.

вод, что среди внешних факторов основную роль в процессе деградации грунта играют изменение знака, амплитуда и время приложения циклических воздействий.

При обработке результатов всех испытаний количество циклов нагружения (N) было выражено в единицах времени: $t = N/f$. Диаграммы усталостной прочности, полученные для грунтов различных ИГЭ, приведены на рис. 6.

На основании выполненных экспериментальных исследований, обработки и обобщения их результатов проведен анализ полученных данных,

послуживший основой для оценки прочности и деформируемости грунтовой толщи при циклических воздействиях, вызванных штормовыми волнами.

Оценка влияния воздействия штормовых волн на устойчивость грунтовой толщи

Поведение грунтов при знакопеременных воздействиях иллюстрируют диаграммы записи результатов испытания, моделирующего длительное воздействие циклической нагрузки и приводящего к разрушению грунта (рис. 7). Они, в частности, показывают, что для ряда изученных грунтов дли-

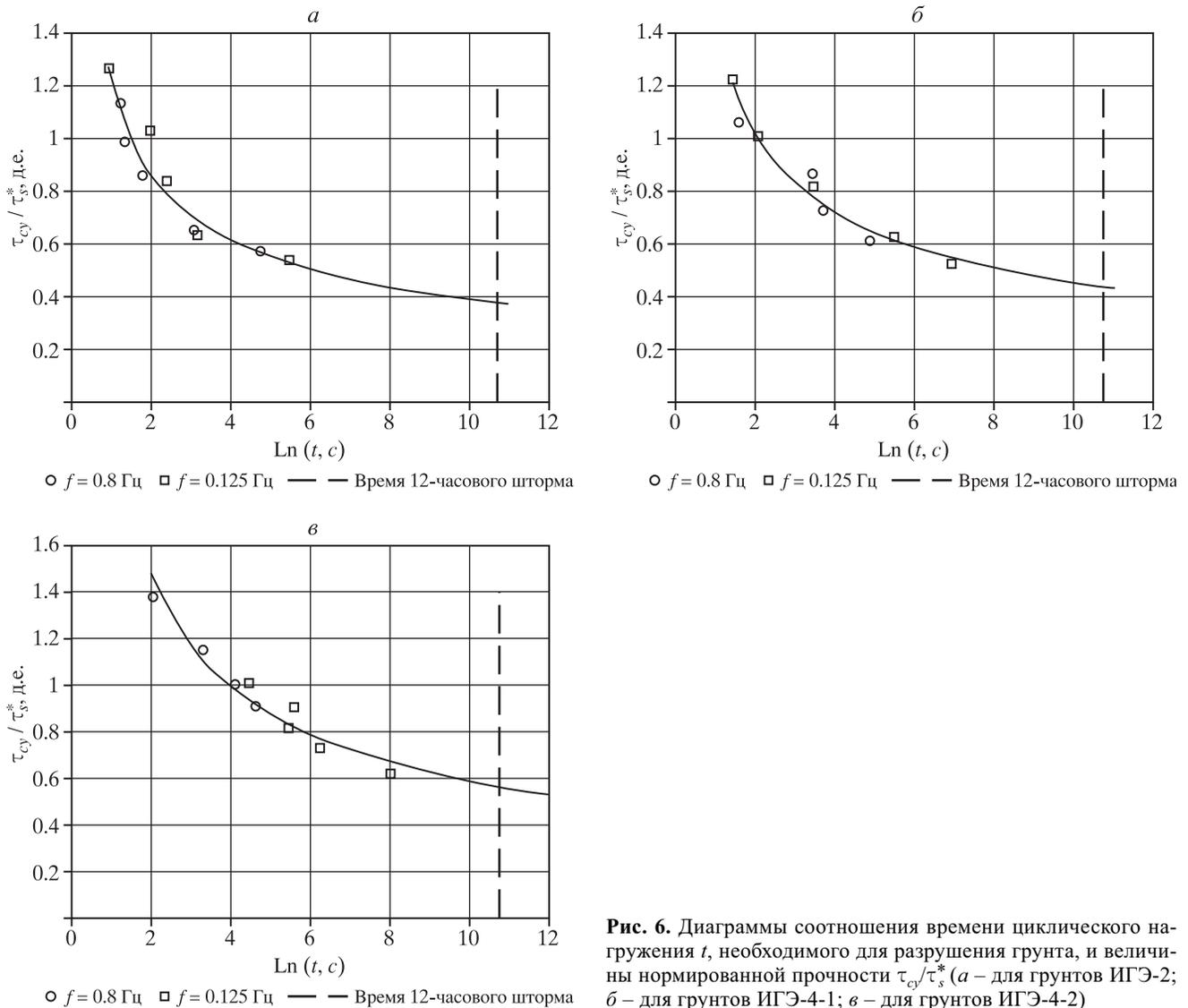


Рис. 6. Диаграммы соотношения времени циклического нагружения t , необходимого для разрушения грунта, и величины нормированной прочности τ_{cy}/τ_s^* (*a* – для грунтов ИГЭ-2; *б* – для грунтов ИГЭ-4-1; *в* – для грунтов ИГЭ-4-2)

тельное нагружение приводит к снижению прочности за счет изменения напряженного состояния вследствие перераспределения нагрузок между минеральным скелетом и поровой жидкостью. Отмечается постоянное накопление избыточного порового давления ΔU в течение времени, которое при достижении значений $\Delta U/\sigma_{1эфф} > 0.9$ д.е., т.е. значений ΔU , близких к эффективному давлению $\sigma_{1эфф}$, приводит к разрушению образцов грунта.

В выполненных экспериментах подобное поведение демонстрируют наименее дисперсные грунты ИГЭ-2; 4-1 и 4-2 (супеси, легкие суглинки с прослоями супеси и песков пылеватых). В мягкопластичных суглинках ИГЭ-5 не отмечено подобного роста порового давления и аналогичного механизма разрушения при длительном циклическом воздействии.

Основываясь на результатах экспериментов, можно выполнить общую предварительную оценку устойчивости грунтовой толщи к нахату штормовых волн. Она проведена для сильного шторма продолжительностью 12 часов. Как показывают прогнозные графики (см. рис. 6), за этот период времени к разрушению могут привести циклические напряжения, составляющие ~ 40 – 60% от статической прочности на сдвиг τ_s^* .

Наиболее чувствительными к воздействию штормовых волн оказались грунты ИГЭ-2 и 4-1, представленные супесями текучими и пластичными, а также суглинками мягкопластичными. Наименее подвержены влиянию супеси пластичные с прослоями песка пылеватого (ИГЭ-4-2).

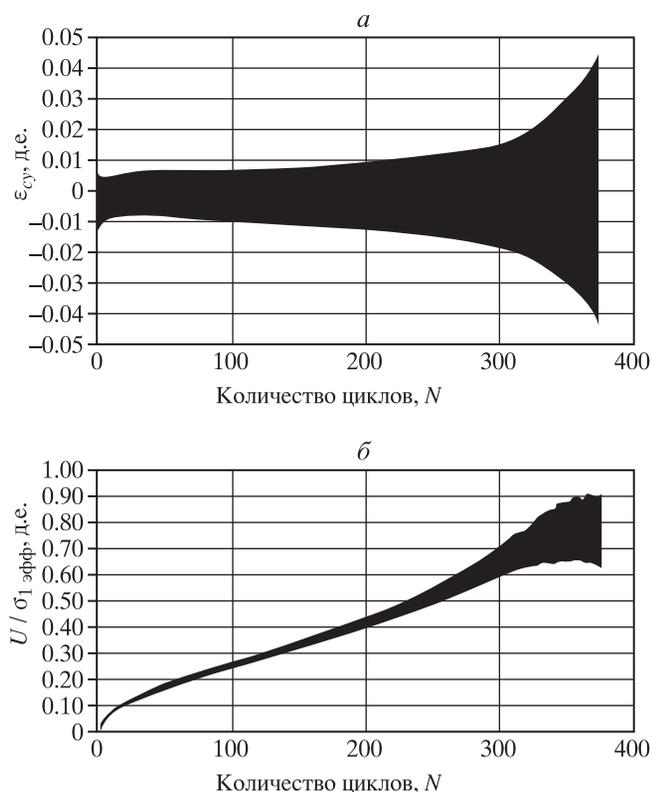


Рис. 7. Характерные диаграммы записей результатов длительных экспериментов (*a* – относительные циклические деформации сдвига ε_{cy} – количество циклов нагружения N ; *b* – относительное поровое давление $\Delta U/\sigma_{1эфф}$ – количество циклов нагружения N).

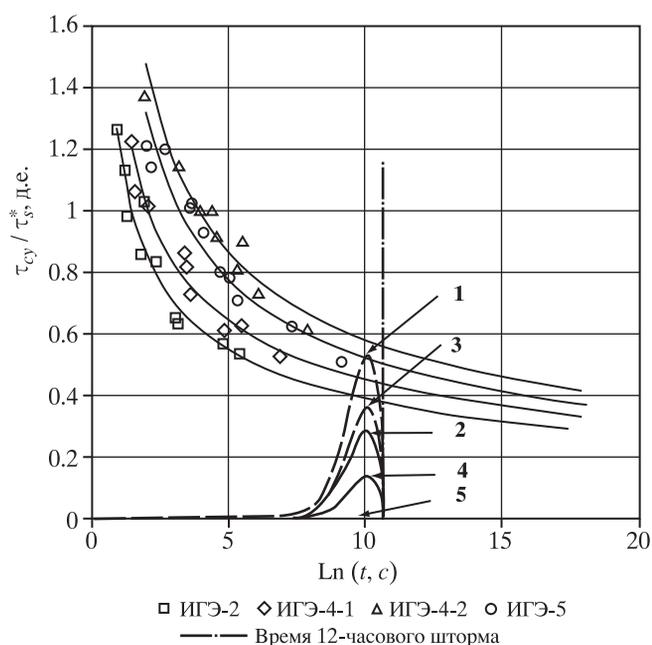


Рис. 8. Диаграммы изменения во времени нормированных волновых нагрузок (для оценки влияния 12-часового шторма; 1 и 2 – экспериментальная волновая нагрузка соответственно на кровле и подошве слоя ИГЭ-2; 3 и 4 – максимальная волновая нагрузка соответственно на кровле и подошве слоя ИГЭ-2; 5 – экстремальная волновая нагрузка на кровле слоя ИГЭ-4-1).

Таким образом, можно заключить, что длительные циклические нагрузки с напряжениями сдвига τ_{cy} , не превышающими ~40% от статического предельного напряжения сдвига, не приведут к разрушению грунта.

Уточнение предварительной оценки устойчивости грунтов выделенных ИГЭ выполняется на основе приведенной выше методики расчетов параметров волновых воздействий и характеристик напряженного состояния толщи. В табл. 3 содержатся значения предельных статических напряжений сдвига для грунтовой толщи, с этими данными сопоставляются результаты оценки возможных максимальных и экстремальных циклических напряжений сдвига при волновой нагрузке, представленные в табл. 4. Как видно, пороговое 40%-ное значение доли циклической нагрузки или относительной амплитуды циклических напряжений сдвига превышено для слоев кровли грунтов ИГЭ-2. Однако эта оценка дана для максимальных и экстремальных высот волн с частотой 0.135 и 0.25 Гц, т.е. продолжительностью в 7.4 и 7.9 с, занимающих лишь часть временного спектра всего шторма.

Для более точной оценки необходимо учесть распределение волновых нагрузок по величине высоты волны в течение принятой 12-часовой продолжительности шторма. Пиковыми значениями напряжений сдвига, соответствующими максимальным и экстремальным высотам волн, принимаются рассчитанные для соответствующих условий $\tau_{cy} = 0.013$ МПа и $\tau_{cy} = 0.020$ МПа. Изменение нормированных волновых нагрузок $\tau_{cy}/\tau_{с}^*$, определенных с учетом распределения нагрузок во времени по высоте волн, для грунтов ИГЭ-2, 4-1 представлено в виде диаграмм на рис. 8 (пунктир – графики изменения экстремальной и максимальной волновой нагрузки на кровле слоя ИГЭ-2, сплошная линия – на подошве слоя). Нормированные циклические напряжения, вызванные воздействиями штормовых волн максимальной высоты, не достигают предельных значений для ИГЭ-2 и нижележащих слоев; при воздействии волн экстремальной высоты возможно разрушение грунтов ИГЭ-2 до глубины ~1.2 м. Это означает необходимость увеличения запаса прочности данных грунтов введением соответствующей поправки для значений параметров их статической прочности.

Принимая эту поправку и резюмируя сказанное выше, можно сделать вывод об отсутствии влияния штормовых волн на устойчивость рассматриваемой грунтовой толщи площадки при рассматриваемых исходных данных.

Таблица 4. Сопоставление результатов расчета циклических напряжений сдвига при волновой нагрузке с предельными статическими напряжениями сдвига

Номер ИГЭ	Поддонная глубина, м	Характеристика грунтов	Напряжения сдвига, МПа		Доля циклической нагрузки, τ_{cy}/τ_s^* , %
			τ_{cy} при макс./экстремальной волновой нагрузке	предельные τ_s^* при статической нагрузке	
2	0.0	Супеси текучие и пластичные	0.013/0.020	0.036	36/55
2	2.9	Супеси текучие и пластичные	0.007/0.014	0.049	14/28
4-1	13.3	Суглинки текучие, текучепластичные и тугопластичные с прослойками супеси пластичной	0.001/0.001	0.087	1/1
4-2	14.9	Супеси пластичные с прослойками песка пылеватого	0.0	0.118	
5	16.6	Суглинки и глины мягкопластичные	0.0	0.088	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования имели целью изучение и оценку влияния на деформируемость и прочность грунтов циклических нагрузок, моделирующих волновые воздействия.

Методология такой оценки устойчивости грунтов при воздействиях штормовых волн включает:

- анализ гидрологических данных, расчет ожидаемых параметров амплитудно-частотного спектра штормовых волн и соответствующих усилий сдвига, действующих на опоры гидротехнического сооружения;

- экспериментальные исследования влияния амплитуды и частоты на устойчивость представительных образцов грунтов в условиях, моделирующих природное напряженно-деформированное состояние и циклические нагрузки от штормовых волн с заданными амплитудно-частотными характеристиками;

- прогноз снижения прочности грунтов на основе анализа графиков усталостной прочности, т.е. диаграмм соотношения длительности циклического нагружения и нормированной величины τ_{cy}/τ_s^* , в которой τ_{cy} представляет собой значение амплитуды циклического напряжения сдвига, а τ_s^* – стандартную прочность, полученную в ходе статического испытания;

- предварительную оценку устойчивости по данным прогноза снижения прочности и их сопоставления с результатами расчета напряжений сдвига при волновых воздействиях на сооружение;

- уточненную оценку возможной деградации грунтов на основе комплексного анализа экспе-

риментальных данных, результатов расчета сдвигающих усилий, гистограмм распределения волн различной высоты во времени в течение действия шторма 12-часовой продолжительности.

Предложенный методический подход использован для оценки возможной деградации грунтов основания площадки месторождения природного сырья, расположенной в северном районе Каспийского моря.

Испытания на длительный циклический сдвиг показали снижение прочности исследованных грунтов, величина которого определяется изменением знака, амплитудой и длительностью приложения переменной нагрузки. Граничное значение длительной циклической нагрузки, не приводящей к разрушению, оценивается величиной, составляющей ~0.3–0.4 д.е. от предельного статического напряжения сдвига τ_s^* .

Оценка уровня деградации грунтов от воздействия штормовых волн показала, что возможность разрушения существует лишь для текучих супесей верхнего ИГЭ-2. По результатам записей параметров экспериментов можно заключить, что процесс разрушения исследованных грунтов обусловлен постепенным повышением порового давления, и, в конечном итоге, восприятием нагрузки поровой жидкостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц И.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 733 с.
2. Eide O., Andersen K.H. Foundation engineering for gravity structures in the Northern North Sea. Norwegian Geotechnical Institute, Publication 154.1984. P. 1–48.

ESTIMATION OF SOIL DEGRADATION UNDER PROLONGED CYCLIC LOADING, MODELING THE STORM WAVE EFFECTS ON A STRUCTURE

V. N. Kutergin*, V. B. Manukin**, K. V. Pankov*, R. G. Kal'bergenov*, and F. S. Karpenko*

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

***Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences
B. Gruzinskaya ul. 10, bld. 1, Moscow, 123995 Russia*

A complex estimation of possible soil degradation under cyclic loading caused by storm waves includes the analysis of hydrological data; the calculation of anticipated storm wave amplitude-frequency spectrum parameters and the corresponding shear forces; the strength prediction based on the experiments performed using the calculated wave parameters and loads; and the final analysis of soil behavior with regard to the time distribution of waves with different heights during the accepted storm activity period. The soil foundation stability was estimated for the site in the North Caspian shelf.

Keywords: *strength, storm waves, shelf soils, cyclic tests, effect parameters.*