

## ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131.4

### ОЦЕНКА РЕАКЦИИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ НАВАЛА ЛЕДОВЫХ ПОЛЕЙ

© 2023 г. В. Н. Кутергин<sup>1,\*</sup>, А. Б. Манукин<sup>1</sup>, Ф. С. Карпенко<sup>1</sup>, К. В. Панков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,  
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

\*E-mail: vank@bk.ru

Поступила в редакцию 28.08.2023 г.

После доработки 19.10.2023 г.

Принята к публикации 19.10.2023 г.

Комплексная оценка возможной деградации грунтов при воздействии длительных циклических нагрузок от движения ледовых полей включала ряд этапов. Предварительно проведена процедура расчета ожидаемых параметров амплитудно-частотного спектра воздействий и соответствующих усилий сдвига. В ходе экспериментов, выполненных с рассчитанными параметрами и нагрузками, получены “кривые деградации прочности”, характеризующие изменение прочности дисперсных грунтов при циклических воздействиях. Факторы, определяющие снижение прочности: циклический характер нагружения, его амплитуда, продолжительность, а механизм — возможное перераспределение напряжений с минерального скелета на поровую воду. Выполнен итоговый анализ поведения грунтов с учетом циклического характера действия ледовых нагрузок в течение зимнего периода принятой продолжительности. Приведены результаты оценки устойчивости грунтового основания площадки на шельфе северной части Каспийского моря.

**Ключевые слова:** *грунты, ледовые поля, параметры воздействия, циклические нагрузки, прочность*

**DOI:** 10.31857/S0869780923050065, **EDN:** ICJBAF

#### ВВЕДЕНИЕ

Ледовый панцирь сезонно или круглогодично покрывает значительные территории водных пространств: рек, озер, морей. Состояние ледового поля, как всякой твердой формы вещества, предполагает существование некоей статичной, стабильной системы. Однако такие возмущения окружающей среды, как ветры, движения подледных водных масс, изменения температур, в целом комплекс гидрометеорологических условий, обуславливают возможность перемещения ледовых полей. Движущийся лед при встрече с препятствием генерирует значительные нагрузки, подчас разрушающие. Преградами в пределах водных акваторий зачастую являются конструкции инженерных сооружений: мосты, порты, причалы, волноломы и пр. При определенных климатических условиях в различных регионах они испытывают значительные давления перемещающихся льдов.

В последние годы проблемы воздействия ледовых полей на объекты инженерной инфраструктуры приобретают все более существенное значение в связи с проектированием и строительством гидротехнических сооружений для обустройства месторождений и добычи полезных ископаемых

на шельфе морей. Для прогноза их устойчивости, обеспечения инженерной и экологической безопасности важна оценка свойств грунтов оснований и их изменений под влиянием движения ледовых полей.

Основная цель выполненных исследований заключалась в определении возможности и оценке изменения механических свойств водонасыщенных дисперсных грунтов при циклических нагрузках, моделирующих воздействия ледовых полей.

Комплексный подход к оценке возможной деградации грунтов оснований при воздействии длительных циклических нагрузок от навала ледовых полей включал ряд необходимых процедур. Методология исследования:

- анализ гидрометеорологических условий и морфометрических характеристик льда;
- расчет ожидаемых параметров амплитудно-частотного спектра движения ледовых полей и соответствующих усилий сдвига;
- выполнение экспериментальных исследований изменения прочности при моделировании рассчитанных параметров и нагрузок;
- итоговый анализ и оценка поведения грунтов с учетом распределения ледовых нагрузок различной

**Таблица 1.** Геологическое строение площадки

Стратиграфический индекс		№ инженерно-геологического элемента (ИГЭ)	Глубина залегания подошвы от дна, м	Наименование грунтов согласно ГОСТ 25100-2020
IIIhv	IIIhv <sub>2</sub> <sup>2</sup>	2–1	2.0–2.9	Суглинки мягкопластичные
		2–2	2.0–4.35	Супеси текучие
	IIIhv <sub>2</sub> <sup>1</sup>	4–2	7.9–8.5	Супеси пластичные с прослойками песка пылеватого
			10.8–11.9	
	IIIhv <sub>1</sub>	5	15.3–15.9 17.2–17.6	Глины и суглинки мягкопластичные, известковистые

**Таблица 2.** Характеристики физико-механических свойств грунтов

Номер ИГЭ	Наименование грунтов	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Влажность, %	Коэффициент пористости, д.е.	Пластичность, %			Модуль общей деформации, Ео, МПа	Прочность	
					W <sub>L</sub>	W <sub>P</sub>	I <sub>P</sub>		С, кПа	φ, град.
2–1	Суглинки мягкопластичные	1.96	27.5	0.765	33.0	20.2	12.8	7.8	23	14
2–2	Супеси текучие	1.99	22.0	0.652	21.6	17.8	3.8	4.9	9	30
4–2	Супеси пластичные с прослойками песка пылеватого	1.95	26.6	0.734	27.6	23.2	4.4	20.8	12	30
5	Глины и суглинки мягкопластичные, известковистые	1.89	34.5	0.950	41.3	24.5	16.8	16.5	24	15

интенсивности во времени в течение действия принятой продолжительности процесса.

### ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предложенная методология опробована на площадках обустройства нефтегазодобывающих сооружений Северного Каспия. В качестве объекта воздействия были рассмотрены гравитационные (опирающиеся на грунт) типовые проектируемые сооружения, в частности, блок-кондуктор (БК) для сбора продукции из куста промысловых скважин.

Упомянутый нами в [1] БК имеет площадь опирания на грунт ~380 м<sup>2</sup> ( $D \approx 11.0$  м), с возможностью дополнительного закрепления опорной юбки на морском дне сваями с глубиной погружения до 50 м.

В качестве опорной площадки сооружения принят участок акватории, геологическое строение которого кратко характеризуется в табл. 1, а показатели состава и физико-механических свойств исследованных грунтов приведены в табл. 2.

### ОЦЕНКА ВЕРОЯТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОТ НАВАЛА ЛЕДОВЫХ ПОЛЕЙ

Для моделирования циклического нагружения образцов необходимо обосновать величину частоты  $f$  и силы  $F$  воздействия на опору сооружения при навале и разрушении ледовых полей.

Движущееся ледяное поле, встречающее преграду, в частности, в виде цилиндрической опоры БК, на уровне поверхности воды воздействует на нее силой, определяемой простым соотношением:

$$F = \sigma_{сж} D h_l,$$

где  $\sigma_{сж}$  – прочность льда на сжатие,  $D$  – диаметр опоры,  $h_l$  – толщина льда.

Для грубой оценки временных характеристик приложенной к опоре нагрузки скорость деформации  $\dot{\gamma}$  льда можно положить постоянной и в соответствии с [3] принять равным:  $\dot{\gamma} \approx v/3D$ , где  $v$  – скорость дрейфа льда. При этом механическое

напряжение линейно нарастает и достигает предельного (прочности льда на сжатие) через время

$$T \approx \sigma_{сж}/E\dot{\nu} \approx \sigma_{сж} 3D/E\nu,$$

где  $E$  – модуль Юнга для льда.

Затем напряжение спадает практически до нуля очень быстро за время  $t \approx 3D/c$ , где  $c$  – скорость звука для льда.

Таким образом, зависимость силы от времени характеризуется относительно медленным нарастанием за время  $T$  до предельного напряжения и возвращением к нулю за время  $t$ . Упругие и прочностные параметры для льда сильно зависят от многих факторов: солёности льда, однородности, температуры и др., поэтому величины  $T$  и  $t$  могут иметь достаточно большой разброс.

Для ширины преграды  $D \approx 11.0$  м, средней скорости дрейфа льда  $\nu = 0.5$  м/с,  $E = 8000$  МПа и прочности льда на сжатие  $\sigma_{сж} = 1.67$  МПа, получим:  $T \sim 0.0138$  с.

Время  $t \approx 3D/c$  составит  $\sim 0.00868$  (продольная скорость звука для льда  $c \sim 3800$  м/с). Вычисления, приведенные выше, не учитывают отрезка времени между моментом разрушения и началом нового цикла накопления напряжений.

В соответствии с [2], под влиянием сосредоточенной силы, приложенной к точке прямолинейного края полубесконечной пластинки толщиной  $h$  и действующей в ее плоскости (аналог ледяного поля), в пластинке возникают напряжения. Вводя полярные координаты с углом  $\alpha$ , отсчитываемым от направления действия приложенной силы, можно рассчитать искомое распределение напряжений:

$$\sigma_{rr} = -2F \cos \alpha / h\pi \cdot r, \sigma_{r\alpha} = \sigma_{\alpha\alpha} = 0.$$

Оно является чисто радиальным, т.е. на всякую перпендикулярную к радиусу площадку, действует только радиальная сжимающая сила. Линиями равных напряжений являются окружности  $r = d \cos \alpha$ , проходящие через начало координат и имеющие центры на прямой действия силы (рис. 1).

В случае воздействия ледяного поля, как только  $\sigma_{rr} \geq \sigma_{сж}$ , лед начинает ломаться, причем, поскольку напряжение обратно пропорционально  $r$ , разрушение происходит в непосредственной близости от кромки на глубину порядка толщины льда  $h_l$ .

Следующий цикл накопления напряжений начнется через время  $t_1 \sim h_l/\nu$ .

Используя данные о толщине и скорости движения льда (рис. 2), для расчета можно принять отмеченные в январе-феврале максимальные значения скорости  $\nu \sim 90$  см/с при толщине льда  $h_l \sim 60$ – $68$  см. Таким образом, интервал времени

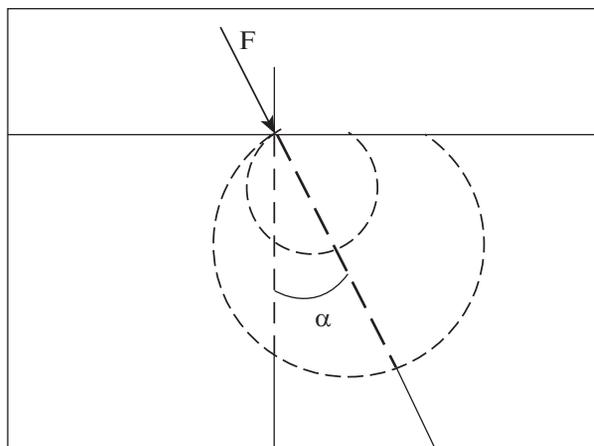


Рис. 1. Линии равных напряжений в полубесконечной пластине под действием силы F.

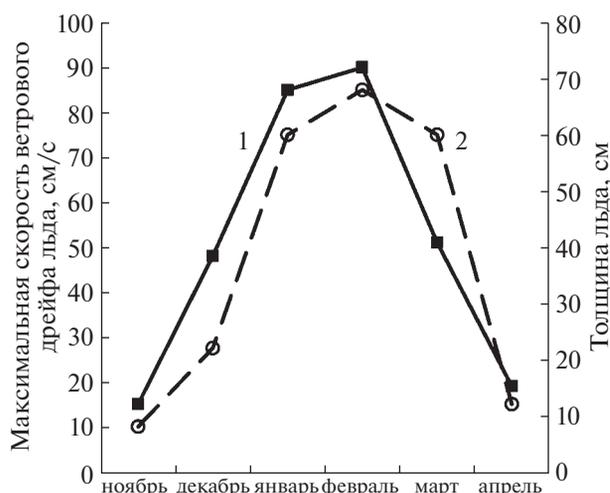


Рис. 2. Изменение максимальной скорости ветрового дрейфа льда (1) и толщины льда (2) по месяцам года.

нового накопления напряжений составит  $t_1 \approx 0.66$  с.

При этом, как следует из графиков, рассчитываемый интервал  $t_1$  может меняться в достаточно широких пределах от 0.44 до 4 с. Если воспользоваться значениями толщины льда  $\sim 60$  см и средней скорости дрейфа ледовых полей  $\sim 50$  см/с, то получим средний интервал  $t_1 \sim 1.2$  с. Это значение можно принять для остальных месяцев зимнего периода, включая декабрь и март.

Схематично график зависимости действующей силы от времени навала ледяного поля на опору платформы имеет пилообразный вид (рис. 3). Основной характерный период воздействия равен  $T_0 \approx T + t + t_1$ , а основная частота  $f \sim 1/T_0$ .

В соответствии с приведенными оценками в январе-феврале преобладают более высокие ча-

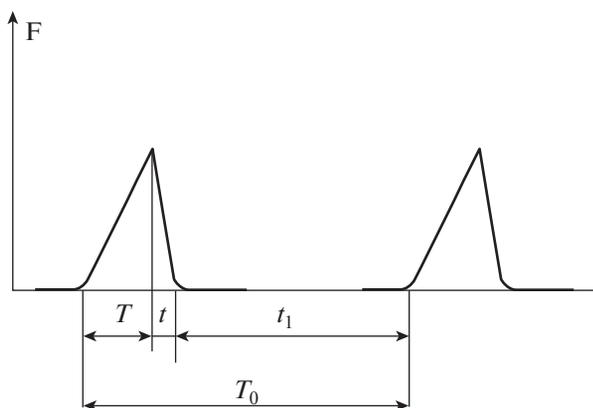


Рис. 3. Зависимость силы  $F$  от времени  $t$  воздействия ледяного поля на опору.

стоты  $f \sim 1.5$  Гц, а в декабре и марте – более низкие  $f \sim 0.8$  Гц.

Уточненную оценку силы, действующей на опору, можно дать, воспользовавшись известным по рекомендациям многих нормативных документов (в частности [3]) соотношением:

$$F = m\sigma_{сж} D h_l k_g,$$

где, в данном случае,  $m$  – коэффициент учета формы поперечного сечения преграды;  $k_g$  – коэффициент учета отличия распределения напряжений в ледяном поле от одномерного, значения которого зависят от  $D/h_l$ . Согласно учебным материалам кафедры “Океанотехника и морские технологии” СПбГМГТУ для цилиндрических преград, принимается значение  $m = 1$ , а  $k_g$  меняется в диапазоне от 1.0 при  $D/h_l = 30$  до 2.5 при  $D/h_l = 1$ .

При расчете силы навала ледового поля для января-февраля принимались экстремальные значения толщины льда  $\sim 68$  см (см. рис. 2), а для декабря и апреля  $\sim 22$  см. Значения коэффициента  $k_g$  составили соответственно  $\sim 1.7$  и  $\sim 1.0$ .

Таким образом, максимальную амплитуду силы для января-февраля можно принять равной  $F \approx \approx 21.2 \times 10^6$  Н, а декабря и апреля  $4.0 \times 10^6$  Н.

Экзаменуя результаты, можно отметить, что наиболее близкие значения дают расчеты, выполненные по стандарту [5]. В соответствии с ним:  $F = 8.1 \cdot \sqrt{Dh}$  (при  $0.1 < Dh < 29.0$ ) составляет  $\sim 22.15 \times 10^6$  Н.

По итогам расчетов, дрейф ледовых полей приводит к тому, что на опору платформы начинает действовать переменная сила  $F$  с максимальной амплитудой  $21.2 \times 10^6$  Н и частотой  $\sim 1.5$  Гц (в январе-феврале месяцах).

При этом оценка амплитуды напряжения сдвига грунта в основании платформы с площадью опирания  $380 \text{ м}^2$  дает максимальное значение  $A\tau_d \approx 0.055$  МПа и минимальное –  $0.011$  МПа.

Параметры напряженно-деформированного состояния, характеризующие условия проведения экспериментов, были приняты, исходя из сведений о массогабаритных характеристиках сооружения, а также данных об инженерно-геологических свойствах грунтов (табл. 3).

### ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Лабораторные экспериментальные работы выполнялись с использованием прибора циклического сдвига ПЦС-3 с программируемым управлением и автоматической регистрацией параметров эксперимента. На фоне действующих статических нагрузок, моделирующих природное напряженно-деформированное состояние грунтов, пульсаторами генерировались сдвигающие горизонтальные циклические нагрузки.

При моделировании принимались некоторые упрощения – пилообразный характер приложения нагрузок аппроксимировался периодическими гармоническими силовыми воздействиями заданной амплитуды, частоты и продолжительности.

Таблица 3. Параметры напряженно-деформированного состояния грунтов для проведения экспериментов

Номер ИГЭ	Принятая глубина залегания от дна, м	Характеристика грунтов	Напряжения по оси сооружения, $\sigma_{1эфф}$ , МПа	Предельные статические напряжения сдвига, $\tau_s^*$ , МПа
2–1	2.0	Суглинки мягкопластичные	0.076	0.045
2–2	4.0	Супеси текучие	0.082	0.054
4–2	16.0	Супеси пластичные с прослойками песка пылеватого	0.187	0.125
5	17.5	Глины и суглинки мягкопластичные, известковистые	0.189	0.076

Для оценки изменения прочности грунтов при циклических нагрузках, моделирующих воздействие движения ледовых полей, выполнялись консолидировано-недренированные циклические сдвиговые испытания образцов. Методика испытаний аналогична подходу, используемому в методических разработках Норвежского геотехнического института (NGI) [6]. В сериях испытаний при различных соотношениях статических и динамических напряжений определяется число циклов нагружения ( $N$ ), необходимое для разрушения грунта.

Предварительно в статических условиях для водонасыщенных образцов определялась так называемая “стандартная прочность” грунта (статическое предельное напряжение сдвига  $\tau_s^*$ ). При осевых уплотняющих нагрузках  $\sigma_{1эфф}$ , соответствующих условиям залегания грунта в массиве и нагрузкам от сооружения, образцы грунтов подвергались действию касательных сдвигающих нагрузок. Использовалась консолидировано-недренированная схема сдвиговых испытаний, при скорости нагружения, позволяющей достигнуть разрушения в течение двух часов [4]. Касательное напряжение, приложение которого вызывало резкий рост сдвиговых деформаций, принималось соответствующим предельному  $\tau_s^*$ . Относительные деформации сдвига  $\epsilon_s^*$  при достижении  $\tau_s^*$  учитывались впоследствии в циклических опытах в качестве критерия разрушения.

Аналогичным процедурам водонасыщения и консолидации подвергались также образцы грунтов, испытанные в дальнейшем при постконсолидационном осевом давлении  $\sigma_{1эфф}$  и циклических воздействиях. Циклические испытания выполнялись в недренированных условиях, путем приложения горизонтальных циклических нагрузок  $\tau_{cy}$  заданной относительной амплитуды  $A_{\tau_{cy}} = \tau_{cy}/\tau_s^*$ . Достижение значений относительных деформаций сдвига  $\epsilon_s^*$  считалось достаточным для преодоления прочности грунта, при этом фиксировались предельное циклическое напряжение  $\tau_{cy}^*$  и соответствующее разрушению число циклов нагружения  $N^*$ .

В сериях испытаний для каждого ИГЭ идентичные образцы подвергались нагрузкам при иных уровнях нормализованных циклических напряжений  $\tau_{cy}/\tau_s^*$ , величину которых выбирали из расчета разрушения образца в пределах  $10^4$  циклов, т.е. двух часов нагружения при выбранных частотах 0.8–1.5 Гц.

В ходе опытов определялись осевые  $\epsilon_1$  и сдвиговые деформации  $\epsilon_{cy}$ , контролировались напряжения  $\sigma_{1эфф}$ ,  $\tau_{cy}$  и относительное давление в поровой воде  $\Delta U/\sigma_{1эфф}$ .

Основными критериями преодоления прочности грунта считались:

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

Использованная методика испытаний аналогична изложенной в [1] методике консолидировано-недренированных циклических сдвиговых испытаний при нагрузках от штормовых волн, но для ледовых воздействий частота  $f$  принималась равной 0.8 и 1.5 Гц.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе выполненных серий испытаний для грунтов каждого ИГЭ определено число циклов  $N^*$ , необходимое для разрушения при различных амплитудах приложенных циклических нагрузок  $\tau_{cy}$ . Сопоставление  $\tau_{cy}$  с уровнем предельных напряжений  $\tau_s^*$  при статическом нагружении позволило охарактеризовать потерю прочности грунта при том или ином количестве циклов  $N^*$  или времени  $t^*$  циклического нагружения.

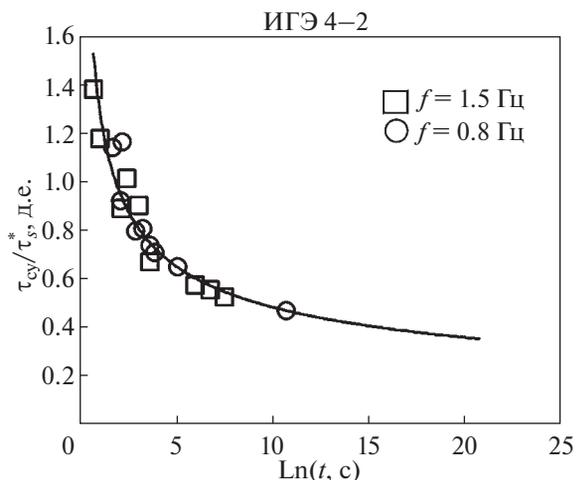
Изменение прочности наглядно выражается в виде “кривой деградации прочности” грунта, т.е. зависимости  $\tau_{cy}/\tau_s^* = f(N)$ . При обработке результатов продолжительность испытаний (число циклов нагружения  $N$  с той или иной частотой  $f$ ) обычно представлялась в единицах времени:  $t = N/f$ .

В качестве примера на графике для грунтов ИГЭ 4–2 приведены значения  $\tau_{cy}/\tau_s^*$ , полученные при воздействиях с разной частотой (рис. 4).

Из анализа данных на рис. 4 следует, что при изменении периода нагружения от 1.25 до 0.66 с, значения времени до разрушения  $t^*$  оказываются близкими, т.е. частота приложения циклической нагрузки в диапазоне  $f = 0.8–1.5$  Гц **существенно не влияет** на конечный результат.

Самым важным итогом циклического воздействия, как видно из графика, является снижение прочности грунтов по мере увеличения амплитуды знакопеременной нагрузки и числа циклов нагружения. Механизм этого процесса для супесей текучих, пластичных (ИГЭ 2–2, ИГЭ 4–2) и суглинков мягкопластичных (ИГЭ 2–1) рассмотрен на основе анализа исходных результатов экспериментов.

Характерные диаграммы результатов воздействия циклической нагрузки представлены на рис. 5.



**Рис. 4.** Диаграмма соотношения времени циклического нагружения  $\text{Ln}(t)$ , необходимого для разрушения грунта, и величины нормированной прочности  $\tau_{cy}/\tau_s^*$  при  $f = 0.8$  Гц и  $f = 1.5$  Гц.

Отмечается накопление во времени осевых циклических деформаций  $\epsilon_{cy}$ , а также избыточного порового давления  $\Delta U$ , которое при дости-

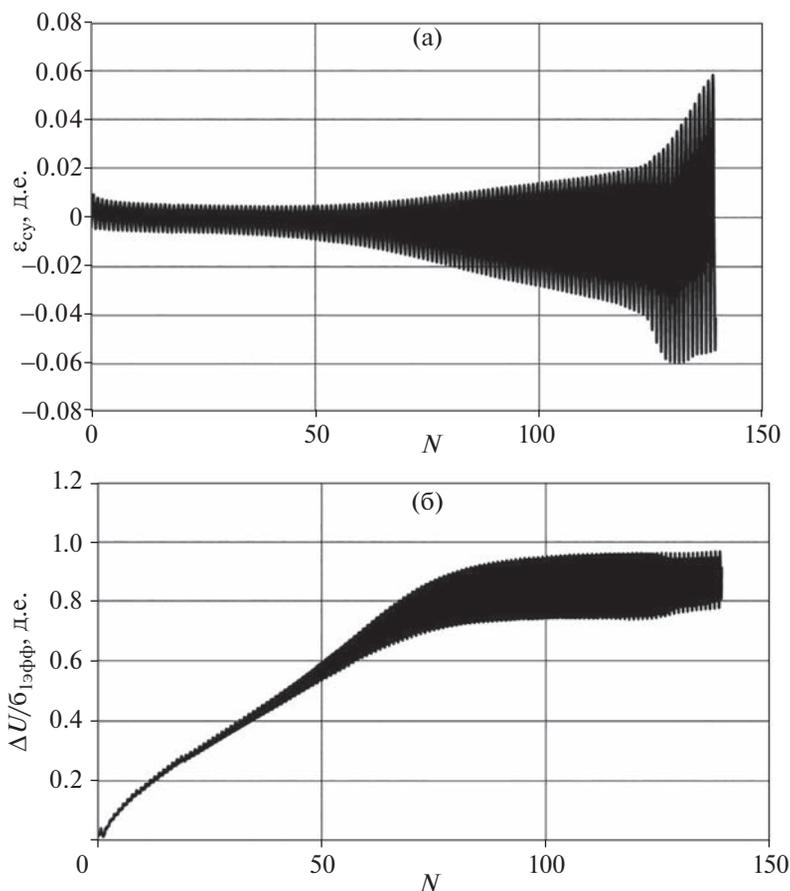
жении значений  $\Delta U/\sigma_{1эфф} > 0.95$  д.е., т.е. значений  $\Delta U$ , близких к эффективному вертикальному давлению  $\sigma_{1эфф}$ , приводит к разрушению образцов грунта.

Таким образом, можно заключить, что для изученных грунтов циклический характер нагружения приводит к *снижению прочности за счет изменения напряженного состояния вследствие перераспределения нагрузок между минеральным скелетом и поровой жидкостью*.

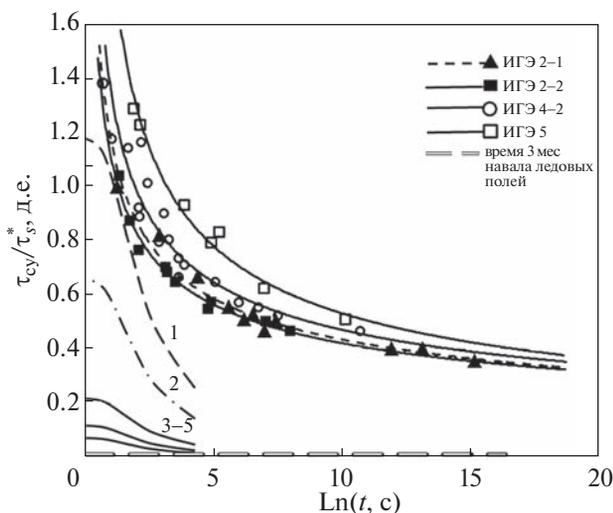
Все результаты выполненных испытаний представлены на рис. 6 в виде диаграмм зависимости времени циклического нагружения  $t$ , необходимого для разрушения грунта, от величины нормированной прочности  $\tau_{cy}/\tau_s^*$ , т.е. уровня циклической нагрузки.

Согласно результатам исследований снижение прочности  $\Delta\tau_s^*$  изученных грунтов при длительно действующих сдвигающих циклических нагрузках может достигать  $\sim 55\text{--}60\%$  от стандартной статической прочности на сдвиг  $\tau_s^*$ .

На графике отмечено время, соответствующее продолжительности движения ледовых полей в



**Рис. 5.** Характерные диаграммы записей результатов длительных экспериментов: а – развитие циклических деформаций сдвига  $\epsilon_{cy}$  по циклам нагружения  $N$ ; б – то же для относительного порового давления  $\Delta U/\sigma_{1эфф}$ .



**Рис. 6.** Диаграммы изменения во времени нормированной прочности  $\tau_{cy}/\tau_s^*$  для грунтов ИГЭ 2–1, ИГЭ 2–2, ИГЭ 4–2, ИГЭ 5. Двойная прямая линия – время 3 мес навала ледовых полей. Максимальная ледовая нагрузка: 1 и 2 – на кровле и подошве слоя ИГЭ 2–1 соответственно, 3–5 – в слоях ИГЭ 2–2, ИГЭ 4–2 и ИГЭ 5 соответственно.

течение трех зимних месяцев. В рамках этого временного интервала можно дать общую предварительную оценку устойчивости грунтов к навалу ледовых полей.

Длительность воздействия, соответствующая этому интервалу, согласно экспериментальным данным и прогнозным графикам (см. рис. 6), может обусловить потерю прочности грунтами при циклических нагрузках, составляющих  $\tau_{cy}/\tau_s^* = 0.38–0.42$  д.е.

Наиболее чувствительными к воздействию навала ледовых полей оказались грунты ИГЭ 2–1 и 2–2, представленные суглинками мягкопластич-

ными и супесями текучими. Наименее подвержены влиянию супеси пластичные (ИГЭ 4–2), а также суглинки и глины мягкопластичные (ИГЭ–5), залегающие в нижней части грунтовой толщи.

При грубой оценке можно заключить, что длительные циклические нагрузки с напряжениями сдвига  $\tau_{cy}$ , не превышающими ~40% от статического предельного напряжения сдвига  $\tau_s^*$ , не приведут к разрушению грунта. Уточнение предварительной оценки устойчивости грунтов выделенных ИГЭ, полученной по результатам экспериментов, может быть выполнено с учетом параметров, рассчитанных для упомянутого выше БК.

Основываясь на оценке возможных максимальных и минимальных циклических напряжений сдвига при ледовой нагрузке, рассчитанных для БК, можно сравнить их с данными табл. 3, содержащими значения предельных статических напряжений сдвига для грунтов.

Сопоставление характеристик статических нагрузок (см. табл. 3) с результатами оценки максимальных и минимальных циклических напряжений сдвига при воздействии ледовых полей показано в табл. 4.

Для длительного зимнего периода (до трех месяцев воздействия ледового поля), поведение грунтов можно оценивать на основе анализа минимальных значений сдвигающих ледовых нагрузок. Как видно, величина  $\tau_{cy}/\tau_s^*$  при этом не превышает 24% для ИГЭ 2–1 и грунтов нижележащих слоев.

При максимальных ледовых нагрузках, пороговое 40-процентное значение доли циклической нагрузки или относительной амплитуды циклических напряжений сдвига превышено для грунтов ИГЭ 2–1, ИГЭ 2–2. Однако эта оценка дана для максимальных параметров ледовых полей, занимающих лишь часть временного спектра всего процесса движения и навала.

**Таблица 4.** Сопоставление характеристик статических нагрузок и циклических напряжений сдвига

Номер ИГЭ	Расчетная поддонная глубина, м	Характеристика грунтов	Предельные напряжения сдвига, при нагрузках, МПа		Доля циклической нагрузки, $\tau_{cy}/\tau_s^*$ , % макс-мин
			ледовых, $\tau_{cy}^*$ макс-мин	статических, $\tau_s^*$	
2–1	1.0	Суглинки мягкопластичные	0.049–0.010	0.041	120 – 24
2–1	2.9	Суглинки мягкопластичные	0.032–0.008	0.048	67 – 17
2–2	4.3	Супеси текучие	0.027–0.007	0.058	47 – 12
4–2	16.0	Супеси пластичные с прослойками песка пылеватого	0.009–0.002	0.125	7 – 1
5	17.6	Глины и суглинки мягкопластичные, известковистые	0.008–0.001	0.076	11 – 1

Уточненный прогноз может быть дан с учетом распределения ледовых нагрузок по величине в течение зимнего периода (декабрь—февраль). В этом случае изменение во времени нормированных ледовых нагрузок  $\tau_{cy}/\tau_s^*$  может выглядеть следующим образом (см. рис. 6). Пунктиром представлены графики изменения максимальной ледовой нагрузки на кровле и подошве слоя ИГЭ 2–1 (линии 1 и 2), сплошными линиями (3–5) — в слоях остальных ИГЭ: 2–2, 4–2, 5. Нормированные циклические напряжения, вызванные воздействиями максимальных ледовых нагрузок, не достигают предельных значений для ИГЭ 2–2, а также нижележащих слоев (ИГЭ 4–2 и 5).

Максимальные циклические напряжения сдвига при воздействии ледовых полей близки к полученным в опытах значениям  $\tau_{cy}/\tau_s^*$  лишь для кровли слоя ИГЭ 2–1, но не превышают их.

*Таким образом, грунтовое основание в рассматриваемом случае можно считать устойчивым к многократным циклическим воздействиям от навала ледовых полей.* Закрепление сооружения сваями может уменьшить действующие циклические напряжения сдвига и создаст дополнительный запас прочности для верхней части придонного слоя грунтов ИГЭ 2–1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Воздействия движения ледовых полей, циклический характер которых определяется гидрометеорологическими факторами, морфометрическими характеристиками (толщиной льда), а также кинематическими параметрами (скоростью движения), обуславливают возникновение значительных нагрузок на сооружения, опирающиеся на грунт.

При этом если металлические или железобетонные конструкции с проектными характеристиками выдерживают ледовый натиск, то дисперсные, водонасыщенные грунты основания могут испытывать деградацию своей прочности, обуславливая снижение устойчивости сооружения в целом.

Для оценки реакции грунтового основания, как цели исследований, *разработана и опробована* методология, включающая ряд этапов:

- расчет параметров воздействия;
- моделирование влияния воздействий на прочность грунтов лабораторными испытаниями образцов на циклический сдвиг;
- анализ результатов и оценка реакции грунтов на циклические воздействия, моделирующие нагрузки от движения ледовых полей.

Следуя этой методологии, на основе имеющихся данных о гидрометеорологических условиях, морфометрии льда и массо-габаритных харак-

теристиках сооружения, проведены расчеты амплитуд и периодов нагрузок для моделирования воздействия движения ледовых полей.

Для оценки частоты действия нагрузок предложена методика расчета полного времени действия цикла нагружения  $T_0 \approx T + t + t_1$ , включающего отрезок времени  $t_1$  между моментом разрушения и началом нового цикла, а также времени накопления  $T$  и спада напряжения  $t$ .

Лабораторное моделирование процесса выполнялось в приборах циклического сдвига на образцах дисперсных грунтов природного разреза, при рассчитанных параметрах воздействий. Итогом моделирования явилось сопоставление циклических предельных напряжений сдвига  $\tau_{cy}^*$ , полученных при различном количестве циклов нагружения  $N^*$ , с уровнем предельных статических напряжений  $\tau_s^*$ .

Анализ результатов экспериментов показал:

- снижение прочности грунтов при изменении характера воздействия с монотонно возрастающего статического на знакопеременное циклическое;

- величина снижения прочности обусловлена амплитудой и длительностью приложения переменной нагрузки, т.е. параметрами, определяемыми гидрометеорологическими условиями площадки и свойствами льда. Граничное значение амплитуды длительной циклической ледовой нагрузки, не приводящей к разрушению, для принятых условий оценивается величиной  $\sim 0.4$  д.е. от предельного статического напряжения сдвига  $\tau_s^*$ ;

- накопление циклов нагружения сопровождается постепенным повышением порового давления, при этом процесс разрушения может быть обусловлен перераспределением нагрузок между скелетом и поровой жидкостью. В отличие от монотонной нагрузки возвратно-поступательное циклические перемещения частиц могут вызывать изменение их ориентации, перекомпоновку, временную локальную потерю контактов в минеральном скелете и возможное восприятие нагрузки средой в поровом пространстве. В изученном грунтовом основании это наиболее характерно для менее дисперсных супесей текучих и пластичных ИГЭ 2–2 и ИГЭ 4–2;

- частота нагружения в принятом по результатам расчетов диапазоне 0.8–1.5 Гц не оказывает существенного влияния на результат.

Заключительным и существенным этапом в оценке реакции грунтов является рассмотрение сценария взаимодействия сооружения с движущимися льдами. Итогом должен стать прогноз поведения грунтов с учетом распределения ледовых нагрузок по величине в течение зимнего периода (декабрь—февраль).

Для рассматриваемого сооружения такой анализ показал, что возможные максимальные ледовые нагрузки при воздействии близки к предельным значениям циклических напряжений сдвига лишь для кровли слоя ИГЭ 2–1, но не превышают их.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутергин В.Н., Манукин А.Б., Панков К.В., Кальберген Р.Г., Карпенко Ф.С. Оценка изменения прочности грунтов при циклических нагрузках, моделирующих воздействия штормовых волн на сооружение // *Геоэкология*. 2015. № 5. С. 450–459.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория упругости. М.: Наука, 1965.
3. СП 38.13330.2018 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения. М.: Минстрой, 2018. 101 с. <https://docs.cntd.ru/document/553863434>
4. Andersen K.H., Kleven A., Heien D. Cyclic soil data for design of gravity structures, *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988. V. 114. № 5. P. 517–539.
5. API RP\*2N. Recommended practice for planning, designing and constructing structures and pipelines for Arctic conditions / Amer: Petroleum Inst. Bulletin. Dallas, 1995.
6. Eide O., Andersen K.H. Foundation engineering for gravity structures in the Northern North Sea. Norwegian Geotechnical Institute. 1984, Publication 154, pp. 1–48.

## EVALUATION OF SOIL RESPONSE IN THE BASE OF ENGINEERING STRUCTURES TO THE IMPACT OF BULK ICE FIELDS

V. N. Kutergin<sup>a,\*</sup>, A. B. Manukin<sup>a</sup>, F. S. Karpenko<sup>a</sup>, and K. V. Pankov<sup>a</sup><sup>a</sup>*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences  
Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia*<sup>\*</sup>*E-mail: vank@bk.ru*

The comprehensive assessment of possible degradation of soils under the influence of long-term cyclic load caused by the movement of ice fields included several stages. First, the procedure of calculating the expected parameters of the amplitude-frequency spectrum of impacts and the corresponding shear forces was performed. In the course of experiments using the calculated parameters and loads, the so-called Wohler curves characterizing the change in the strength of dispersed soils under cyclic influences were obtained. The following factors control the decrease in strength: the cyclic nature of loading, its amplitude and duration; whereas, its mechanism consists in the possible redistribution of stress between the mineral skeleton and the pore water. The final analysis of soil behavior was completed taking into account the cyclic ice load in winter period of the accepted duration. The results of soil-stability assessment in the ground base at the site in the northern part of the Caspian Sea shelf are presented.

**Keywords:** soils, ice fields, impact parameters, cyclic loads, strength

## REFERENCES

1. Kutergin, V.N., Manukin, A.B., Pankov, K.V., Kal'bergenov, R.G., Karpenko, F.S. [Evaluation of changes in soil strength under cyclic loads simulating the impact of storm waves on a structure]. *Geoekologiya*, 2015, no. 5, pp. 450–459. (in Russian)
2. Landau, L.D., Lifshits, E.M. [Theoretical physics. Theory of elasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1965. (in Russian)
3. SP 38.13330.2018 [Loads and impacts on hydraulic structures]. Moscow, Minstroy Publ., 2018. 101 p. <https://docs.cntd.ru/document/553863434> (in Russian)
4. Andersen, K.H., Kleven, A., Heien, D. Cyclic soil data for design of gravity structures, *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, vol. 114, № 5, pp. 517–539.
5. API RP\*2N. Recommended practice for planning, designing and constructing structures and pipelines for Arctic conditions. *Amer. Petroleum Inst. Bulletin*. Dallas, 1995.
6. Eide, O., Andersen, K.H. Foundation engineering for gravity structures in the Northern North Sea, Norwegian Geotechnical Institute, 1984, Publication 154, pp. 1–48.