

ОЦЕНКА РАЗЖИЖАЕМОСТИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ ЯКОРЕЙ ПОЛУПОГРУЖНЫХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ

В статье приведен обзор проблем, связанных с сейсмической разжижаемостью донных грунтов. Показана опасность разжижения грунтов оснований морских платформ и трубопроводов. Приведены результаты оценки сейсмической устойчивости дисперсных отложений на двух площадках в зоне Туапсинского прогиба в Черном море с использованием лабораторных динамических трехосных испытаний. Установлены разновидности потенциально разжижаемых грунтов этих площадок. Рассмотренный в статье производственный опыт показал, что при установке заякоренных морских сооружений необходимо оценивать возможность разжижения грунтов основания якорей. Также показано, что при сильных землетрясениях в силу своих специфических свойств разжижаются сапропели. Сделанные выводы могут оказаться полезными для специалистов в области инженерного обеспечения поиска и разведки месторождений углеводородов и при обустройстве буровых установок временного типа на шельфе.

Миронюк Сергей Григорьевич

ООО «Газпром инжиниринг», 117418, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 25А. Тел.: (495) 657-88-24, факс: (495) 657-99-36, e-mail:mironyuk.sg@gaz-eng.ru

Озмидов Олег Ростиславович

ОАО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ», 129344, г. Москва, ул. Искры, д. 31, корп. 1. Тел. (495) 656-69-10, e-mail:ozmidov@mail.ru

Опыт эксплуатации морских сооружений показал, что среди задач морской инженерной геологии и проектирования на первое место выходят вопросы обеспечения устойчивости объектов обустройства нефтегазовых промыслов. Элементом морских объектов, несущая способность которого в значительной степени определяет их механическую прочность и устойчивость, является грунтовое основание сооружений. Согласно оценкам Норвежского геотехнического института основной причиной аварий буровых платформ в Северном море (24 % от их общего числа) являлся недоучет тех или иных особенностей свойств грунтов оснований в активной зоне платформ.

В частности одной из причин аварий может быть разжижение грунтов при циклических нагрузках. Волновые и сейсмические воздействия могут снижать сдвиговую прочность и вызвать деформации основания морских сооружений, нарушающих их общую устойчивость [1,4,5]. При разжижении донных грунтов могут возникать кратерообразные воронки – покмарки, что часто сопровождается образованием свободных пролетов, выбросом токсичных газов, потерей плавучести плавсредств [3].

Макросейсмическое обследование последствий землетрясений, лабораторные исследования показали, что в некоторых случаях разжижаются не только песчаные, глинистые грунты и илы, но и песчано-гравийные и даже галечниковые отложения [7].

Аварии гидротехнических сооружений, в т. ч. по причине потери их устойчивости, приводят к прекращению добычи или к выбросу нефти и газа из морских скважин,

хранилищ и трубопроводов, сопровождаются, в ряде случаев, значительным экологическим и экономическим ущербом.

В 2013 г. ООО «Питер Газ» выполнил комплексные инженерные изыскания на двух площадках в северо-восточной части Черного моря в пределах Туапсинского прогиба. Оценка инженерно-геологических площадок выполнялась с точки зрения их благоприятности для строительства поисково-разведочной скважины и установки якорей полупогружной буровой установки (ПБУ).

Туапсинский прогиб территориально относится к Альпийско-Гималайскому сейсмическому поясу, характеризующемуся высокой сейсмической активностью. Район работ был расположен в пределах подводного конуса выноса палео-Кубани. Он характеризуется протяжённым веерообразным шлейфом с пологой волнистой поверхностью, интенсивно расчленённой в верхней части протяжёнными каньонами и оползневыми процессами. Уклоны дна достигают 1-2 градуса.

Учитывая, что сейсмичность в баллах шкалы MSK-64 района проектируемого строительства скважин достигает 8-9 баллов, а магнитуа максимального расчетного землетрясения (МРЗ) составляет 6,5, были выполнены испытания указанных грунтов методом динамического трехосного сжатия для определения возможности их динамического разжижения [8].

Инженерно-геологические условия площадок с помощью донных пробоотборников были изучены до глубины 15 м. Как показали изыскания, верхняя часть геологического разреза в месте установки якорей сложена голоцен-плейстоценовыми отложениями. В разрезе выделено 6 инженерно-геологических элементов. Донные отложения представлены:

- илом текучим глинистым, залегающим с поверхности;
- глиной текучей с прослоями сапропелей высокоминеральных;
- глиной текучей с прослоями сапропелей высокоминеральных и песка;
- суглинком текучим с прослоями песка, супеси;
- песком пылеватым с прослоями суглинка и глины;
- глиной текучей с прослоями суглинка, песка.

По результатам полевых и лабораторных работ изученные грунты характеризуются следующими свойствами и составом:

Ил глинистый текучий - распространен повсеместно, мощность осадков составляет 0,1-1,75 м. Плотность грунта (ρ) – 1,40-1,46 г/см³ (здесь и далее указаны средние значения характеристик грунтов), влажность (W) – 99,4-118,3%, коэффициент пористости (e) – 2,64-3,12. Содержание органического вещества составляет 0,112-0,227 д. е., карбонатов (CaCO₃) – 8,1-34,4%.

Глина текучая, с прослоями сапропелей, имеет региональное распространение, мощность составляет 0,1-4,3 м. Плотность грунта – 1,45 - 1,46 г/см³, W – 98,5-99,8 %, e – 2,63-2,73. Содержание органического вещества составляет 0,092-0,213 д. е., CaCO₃ – 8,1-28,4%.

Глина текучая с прослоями сапропелей, песка пылеватого, встречается повсеместно, мощность составляет 0,4-3,8 м. Плотность грунта – 1,54-1,61 г/см³, W – 71,8-78,0%, e – 1,92-2,20. Содержание органического вещества составляет 0,032-0,168 д. е., CaCO₃ – 8,1-33,2%.

Образование сапропелей (рис. 1) связано с прорывом больших масс тяжелых соленых средиземноморских вод богатых сульфатами в Черное море в результате послеледникового подъема уровня Мирового океана, что привело к затруднению вертикального водообмена в глубоководной котловине, возникновению мощного слоя

сероводородного заражения и массовому накоплению сапропелевых илов на дне Черноморской впадины.

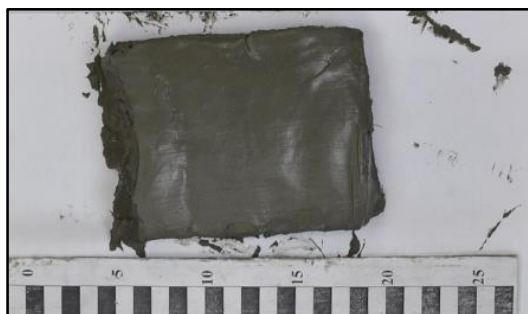


Рис. 1. Фотография керна сапропеля высокоминерального (Туапсинский прогиб, площадка №1, гл. 1,30-1,45 м)

Физические свойства сапропеля следующие: W – 130,4-137,7 %, ρ – 1,36 г/см³, e – 3,64-3,81. S_u (сопротивление недренированному сдвигу, испытания грунтов выполнялось лабораторной крыльчаткой) - 2,0-4,4 кПа. В гранулометрическом составе преобладает глинистая фракция: 58,0%; содержание пылеватой фракции: 29,5%, песчаной: 12,5%. Содержание органического вещества в сапропели составляет 0,058-0,220 [2].

Суглинок текучий с гидротроилитом, с прослоями песка, супеси, мощность составляет 0,3-4,30. Плотность грунта – 1,69-1,73 г/см³, W – 50,8-66,9%, e – 1,44-1,67. Содержание органического вещества составляет 0,049-0,168 д. е., $CaCO_3$ – 8,1-32,4%.

Песок пылеватый с прослоями суглинка и глины, выявлен и опробован только в одной станции пробоотбора, мощность песчаных грунтов составляет 2,25м, единичные определения физических свойств составляют: ρ – 2,05г/см³, W – 22,6%, e – 0,61. Содержание органического вещества составляет 0,016, $CaCO_3$ – 16,2%.

Глина текучая, с частыми прослоями суглинка, песка, опробованная мощность составляет 1,2-8,4м. Плотность грунта – 1,63г/см³, W – 68,1 %, e – 1,96. Содержание органического вещества составляет 0,058-0,181 д. е., $CaCO_3$ – 8,1-28,4%.

Все изученные грунты имеют высокую пористость и влажность, текучую и текучепластичную консистенцию, небольшую прочность и большую сжимаемость. Значения скоростей поперечных волн (V_s) в песчаных породах в интервале глубин 0-15 м составляет менее 215 м/с, что свидетельствует о возможности разжижения указанных грунтов [6].

С целью оценки сейсмической разжижаемости грунтов площадки строительства были проведены экспериментальные исследования на образцах, отобранных в диапазоне глубин 0,1-14,3 м. В процессе проведения лабораторных работ выполнено 99 опытов по методу циклического трехосного сжатия для расчетных землетрясений магнитудой 5,5; 6,0 и 6,5 (таблица).

Таблица

Параметры прогнозируемых сейсмических воздействий

Магнитуды	5,5	6	6,5
-----------	-----	---	-----

Период повторяемости	500	1000	5000
Площадка №1, PGA (g)	0,16	0,21	0,35
Площадка №2, PGA (g)	0,14	0,18	0,31

Испытуемые грунты были представлены глинами тяжелыми, глинами легкими, суглинками тяжелыми, суглинками легкими, супесями и сапропелями.

Лабораторные испытания проводились в геотехнической лаборатории ОАО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ» с использованием сервогидравлического циклического стабилометра «Wille GeoTechnik 13-HG» (рис. 2). Определение параметров сейсмического разжижения осуществлялось в соответствии со стандартом предприятия ОАО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ», разработанным согласно требованиям ASTM D5311-96 [9].

В процессе выполнения исследований выполнялся спектральный анализ сигнала-отклика одномассового осциллятора «устройство нагружения - испытуемый образец» по каналу «акселерометр – АЦП - сигнальный процессор» с использованием программного средства «SPECTRO-S».



Рис. 2. Сервогидравлическая стабилометрическая установка Wille GeoTechnik 13-HG/020:001(Германия)

Методика определения параметров сейсмической разжижаемости грунтов разработана американскими учеными Сидом и Идрисом в 1971 г. [11]. Этот метод с незначительными усовершенствованиями [12] используется в настоящее время в большинстве геотехнических лабораторий мира. Испытанию образцов циклическими нагрузками предшествуют этапы подготовки образцов, их водонасыщения и анизотропной консолидации. Подготовленные образцы с заданным начальным напряженным состоянием подвергаются действию циклической нагрузки, величина которой рассчитывается для заданной магнитуды М по формуле Сиды и Идриса:

$$\tau_a = 0,65 \sigma_1 \frac{a_{\max}}{g} r_d, \quad \text{где}$$

τ_a - циклическое напряжение сдвига для магнитуды М;

σ_1 - эффективное вертикальное (осевое) напряжение, которое рассчитывается с учетом взвешивающего эффекта воды;

a_{\max} - максимальное горизонтальное ускорение в поверхностных слоях грунтов в условиях прогнозируемого землетрясения заданной магнитуды М;

g - ускорение свободного падения в гравитационном поле Земли;

r_d – коэффициент редукации (ослабления) напряжений с глубиной, учитывающий гибкость колонки грунта (поведению жесткого тела соответствует $r_d = 1$).

Основным контролирующим параметром в процессе проведения опыта является приведенное поровое давление PPR , равное отношению давления U , регистрируемого датчиком порового давления, к гидростатическому давлению в камере стабилометра σ_3 .

В процессе выполнения опыта ведется контроль относительного порового давления. Приближение PPR на последних расчетных циклах нагружения к асимптоте $PPR=1$ свидетельствует о возникновении условий для разжижения грунта. При этом давление внутри образца становится равным внешнему обжимающему давлению и грунт переходит во взвешенное состояние. Факт пересечения траекторией нагружения оси тангенциального октаэдрического напряжения свидетельствует об инверсии эффективных напряжений в процессе циклического нагружения. Возникающие в результате инверсии растягивающие напряжения снижают сдвиговую прочность, увеличивая тем самым вероятность разжижения грунта. Косвенным признаком этих процессов являются большие значения накопленной деформации.

Результаты трехосных циклических испытаний с заданным значением ускорения g свидетельствуют о динамической устойчивости испытуемых грунтов при уровне ускорений, соответствующим прогнозируемым землетрясениям с периодами повторяемости (T) 500 лет и 1000 лет. Приведенное поровое давление PPR по результатам проведенных испытаний, рассчитанная по 6 и 7 циклу испытаний во всех случаях не превышало значения 0,97.

Максимальная относительная вертикальная деформация, накопленная к моменту завершения последнего расчетного цикла вынужденных колебаний оставалась в пределах 0,089. Траектория нагружения в плоскости эффективных октаэдрических напряжений проходит на достаточном удалении от начала координат, что свидетельствует о низкой вероятности сейсмического разжижения исследуемых грунтов. Существенного расширения спектра сигнала-отклика сейсмоосциллятора не наблюдается.

Ситуация меняется при испытаниях, моделирующих максимальное землетрясение для периода повторяемости 5000 лет. В этом случае в расчет циклического напряжения закладывается значения максимальных пиковых ускорений (PGA) 0,31-0,35 g , соответствующих магнитуде расчетного землетрясения 6,5.

Установлено, что наиболее чувствительными к циклическому воздействию заданной амплитуды оказались сапропели высокоминеральные, мощностью 0,2-0,3 м, характеризующиеся текучей консистенцией и высоким e : 3,13 – 4,96 (частные значения). В отдельных случаях на небольших глубинах (до 1,3 м) залегания данные грунты проявили свойства сейсмической разжижаемости в условиях прогнозируемого максимального землетрясения.

На площадке №1 для образцов сапропеля с $e = 3,3-4,23$ наблюдается явно выраженное пересечение траектории нагружения начала координат октаэдрической плоскости, что свидетельствует о переходе грунтовых частиц во взвешенное состояние (рис.3). В этом случае все внешние напряжения воспринимает на себя внутрипоровый флюид. Значение относительного порового давления достигает значения 0,998. Накопленная к последнему десятому циклу испытаний относительная деформация достигает сравнительно высокого значения 0,089. В ряде случаев потенциал разжижения сапропеля высокоминерального находится на критическом уровне. Траектория нагружения при этом проходит в непосредственной близости от начала координат. Уровень относительного порового давления достигает значения 0,985. Значение накопленной относительной деформации составляет 0,094.

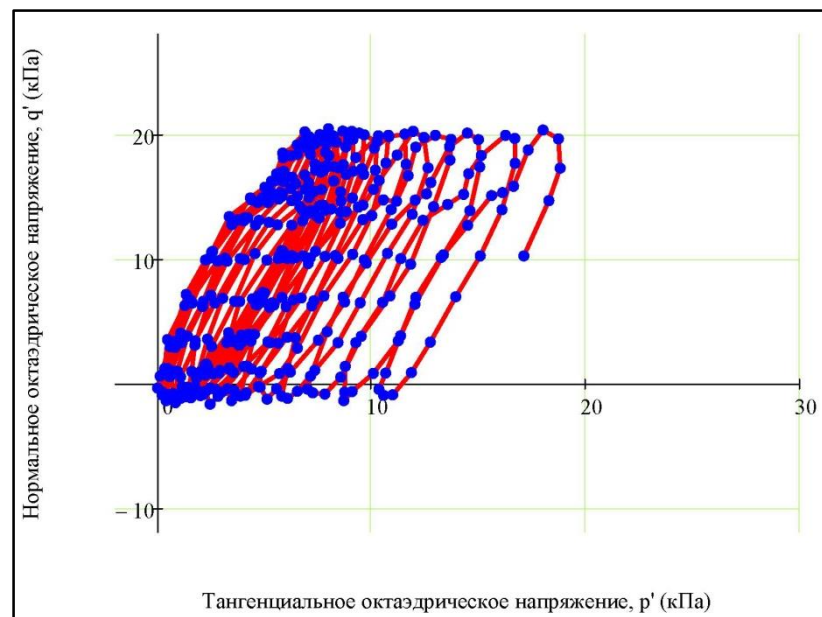


Рис. 3. Диаграмма напряженного состояния (Туапсинский прогиб, площадка №1, сапропель высокоминеральная, гл. отбора 1,3 м)

На площадке №2 в ряде случаев потенциал разжижения сапропеля высокоминерального также находится на критическом уровне. Траектория нагружения на диаграммах напряженного состояния проходит в непосредственной близости от начала координат. Уровень относительного порового давления достигает значения 0,994. Значения накопленной относительной деформации находятся в интервале от 0,094 до 0,114.

Указанные характеристики позволяют отнести данную разновидность грунтов к категории условно динамически устойчивых грунтов при сценарном землетрясении с магнитудой $M = 6,5$ ($T = 5000$ лет).

Резюмируя вышеизложенное, можно заключить, что исследуемые грунты на площадках обладают достаточным запасом динамической устойчивости и могут быть использованы в качестве грунтового основания при строительстве скважин и установки якорей, находящихся в зоне прогнозируемого сейсмического события магнитудой 5,5 и 6,0 ($T = 500$ лет и 1000 лет.). При землетрясении магнитудой 6,5 ($T = 5000$ лет) на отдельных участках, где в верхней части грунтовой толщи имеются прослои сапропеля высокоминерального мощностью 0,2-0,3 м, возможно разжижение указанных грунтов и их латеральное растекание.

Список литературы

1. Беллендер Е. Н., Смирнов Ю. Г., Погребняк Б. Н. Динамические испытания на прочность несвязных грунтов основания гравитационных конструкций на морском шельфе//Труды международной конференции РАО-03. СПб.2003. С. 207-208.
2. Миронюк С. Г. Особенности грунтовых условий абиссальной равнины Черного моря // Сергеевские чтения. Развитие научных идей академика Е. М. Сергеева на современном этапе. Юбилейная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения академика Е. М. Сергеева. Вып. 16. Материалы годичной сессии Научного

- совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (21 марта 2014 г.). Москва: РУДН, 2014. С. 66-72.
3. Миронюк С. Г., Отто В. П. Газонасыщенные морские грунты и естественные газовыделения углеводородов: закономерности распространения и опасность для инженерных сооружений// Геориск. 2014. № 2. С. 8-18.
 4. Миронюк С. Г., Озмидов О. Р. Опыт оценки динамической устойчивости грунтов оснований объектов инфраструктуры морского порта Темрюк //Сергеевские чтения. Развитие научных идей академика Е. М. Сергеева на современном этапе. Юбилейная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения академика Е. М. Сергеева. Вып. 17. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (19-20 марта 2015 г.). Москва: РУДН, 2015. С.166-171.
 5. Миронюк С. Г., Манжосов С. В., Ионов В. Ю. Оценка разжижаемости грунтов на площадках строительства подводных трубопроводов и добычного комплекса в районах северо-западного и северо-восточного шельфа о. Сахалин//Инженерные изыскания. 2011. №6. С.6-14.
 6. Проект национального стандарта ГОСТ Р «Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов». Вторая редакция//Геотехника. 2013. №4. С. 37-68.
 7. Солоненко В. П. Инженерная сейсмогеология. Некоторые проблемы и задачи// Инженерная геология. 1988. №1. С. 3-13.
 8. СП 11-114-2004. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений/Госстрой России. М.: ФГУП «ПНИИИС» Госстроя России, 2004. 97 с.
 9. ASTM 5311-96. Standard test methods for load controlled cyclic triaxial strength of soil. USA: ASTM, 2000.
 10. Nasiatou, T., Papatheodorou G., Kastanos, N., Ferentinos, G. A pockmark field in the Patras Gulf (Greece) and its activation during the 14/7/93 seismic event // Marine Geology. 1996. 130. S. 333-344.
 11. Seed H.B., Idriss, I.M. Simplified Procedure for Evaluation Soil Liquefaction Potential// Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 97, No. SM9, Sep., 1971, pp. 1249-1273.
 12. Idriss, 2004.