

УДК 624.042.8:622.242.422 (262.81)

А. С. Маштаков

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕДИНАМИЧЕСКИЕ РИСКИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НЕФТЯНЫХ ПЛАТФОРМ С ГРУНТОМ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

Обосновывается необходимость учета геологических и геодинамических рисков, приводящих к понижению физико-механических свойств грунтов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: геодинамические риски, геологические риски, мелкозалегающий свободный газ, Каспийское море, нефтяные платформы, самоподъемные буровые установки.

The necessity of taking into account the geological and geodynamic risks, leading to the decrease in physical and mechanical properties of the soil is proved.

К е у w o r d s: geodynamic risks, geological risks, shallow free gas, the Caspian sea, oil platforms, jack-up drilling rigs.

В настоящее время требуется разработать методики по комплексному учету всех геодинамических и геологических рисков при расчетах несущей способности свайных фундаментов нефтяных платформ и опорных колонн самоподъемной плавучей буровой установки (СПБУ). Актуальность данной задачи подтверждается Федеральным законом № 117 «О безопасности гидротехнических сооружений» [1], регламентирующим нормы безопасности при осуществлении деятельности, связанной с проектированием, строительством и эксплуатацией гидротехнических сооружений.

Проблема выбора методов анализа для оценки геодинамических рисков и рисков по влиянию мелкозалегающего опасного свободного газа на прочность грунта в настоящее время является весьма актуальной. Если при расчете несущей способности оснований платформ проектные организации еще учитывают геодинамические риски, то учет влияния мелкозалегающего опасного свободного газа на грунты не производится из-за малой изученности данного процесса.

Например, в 2002 г. были опубликованы результаты серии испытаний стандартным консолидометром с целью показать воздействие выделения газа на процесс сжатия глин дельты р. Нил [2]. Как показано на рис. 1, чем выше содержание газа, тем выше сжимаемость до тех пор, пока кривые сжатия не становятся практически параллельными после того, как газовые пузырьки лопаются.

Впервые экспериментально снижение предуплотняющего давления с содержанием газа было замечено в работах [3].

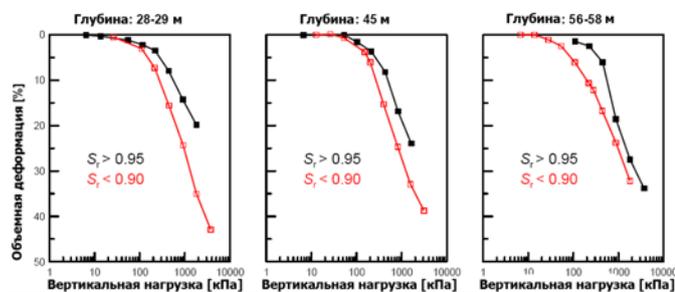


Рис. 1. Воздействие выделения газа на исследования глины из дельты р. Нила консолидометром [2]

В дополнении к испытаниям консолидометром была проведена серия анизотропно дренированных испытаний на трехосное сжатие со сдвигом при сжатии на образцах глин. Рис. 2 ясно показывает, что деструктуризация по причине разделения газа также приводит к характерному изменению траектории эффективного напряжения.

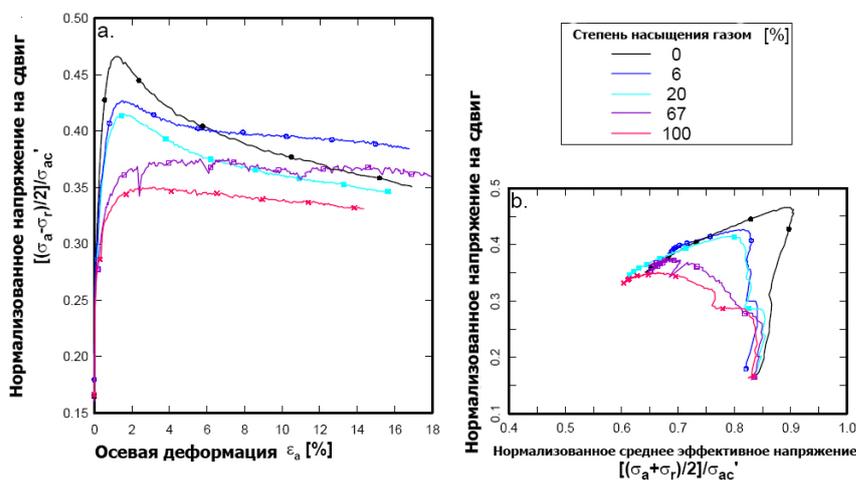


Рис. 2. Результаты анизотропно дренированных испытаний на трехосное сжатие со сдвигом при сжатии, проведенные на глине [3]: *a* — кривые зависимости напряжения от растяжения; *b* — траектории эффективной нагрузки

В теории, если давление газа равняется гидростатическому давлению, процесс бурения изменяет общее давление. Часто выбросы газовой смеси стимулируются при проведении специальных работ, таких как поднятие буровой трубы, поднятие штанг СРТ или начало извлечения пробных образцов. Отдельный газ способствует созданию пузырьков внутри колонки и, возможно, в кольцевом пространстве. Разделение газа может привести к его неконтролируемым выбросам снаружи буровой трубы. На рис. 3 показан фонтанирующий выброс водяной пульпы с метаном из обсадной колонны после отбора грунта на одном из нефтяных месторождений в Каспийском море.



Рис. 3. Выброс водяной пульпы с метаном

Проблема выбора методов анализа для оценки геологических и геодинамических рисков, возникающих при проектировании и строительстве нефтегазопромысловых сооружений, в настоящее время является весьма актуальной.

Анализ риска чрезвычайно важен на стадии концептуального проектирования и технико-экономического обоснования обустройства месторождений. Зачастую в проектах требуется выявить и оценить данные риски.

Циклическое воздействие (в том числе сейсмическое), имеющее переменный по направлению вектор смещения частиц, является определяющим при оценке возможного разжижения несвязных и слабосвязных грунтов. Основой методики оценки разжижения являются периодически обновляемые материалы мирового сообщества геотехников [4, 5] и результаты трехосных испытаний грунтов.

Для определения динамического модуля сдвига в диапазоне деформаций $10^{-5} < \gamma < 10^{-2}$ используются две методики:

- 1) прямые измерения скорости поперечных волн в грунте с помощью ультразвукового зондирования образцов грунта и вычисление модуля сдвига;
- 2) использование результатов трехосных испытаний в соответствии со стандартом ASTM D 3999—96 [6]. Для этого строятся петли нагружения, аналогичные представленной на рис. 4, и по ним определяются модуль деформации и коэффициент демпфирования (затухания).

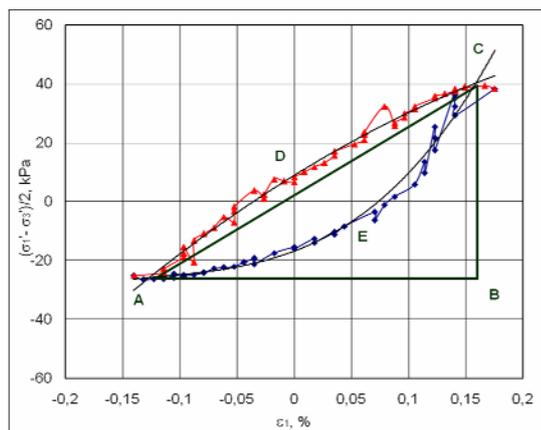


Рис. 4. Петля деформаций при циклическом нагружении, $E = BC / AB$; $D = S_{пет} / \tau S_{треуг}$

Рассмотрим изменение прочностных характеристик грунтов из-за влияния опасного свободного газа и циклических воздействий.

Влияние циклических воздействий на физико-механические свойства грунта. При проектировании нефтегазопромысловых сооружений учитываются такие геодинамические риски, как циклическое и динамическое разжижение грунта от ледовых, сейсмических и волновых нагрузок, а также учитывается залегание на глубине в грунтах опасного свободного газа, который плохо изучен и сильно ухудшает физико-механические свойства грунта.

После проведенных исследований грунтов в Северном Каспии выявлено, что верхняя часть грунтовой толщи подвергается влиянию динамических (циклических) воздействий, следовательно, возможно разжижение грунтов.

Оценка влияния сейсмических, волновых и ледовых воздействий на прочностные свойства несвязных и связных грунтов дается по величине расчетного параметра динамической прочности, представляющего собой соотношение значений при динамических и статических нагрузках.

Оценка устойчивости грунтов основания сооружения месторождения им В. Филановского проводилась для следующих параметров проектного землетрясения: магнитуда $M_{\max} = 6,0$; балльность 8,0; максимальное ускорение на поверхности 0,15g. Длительность сейсмического воздействия в соответствии с рекомендациями [4, 5] зависит от магнитуды. Для $M = 6,0$ определяющими являются шесть циклов воздействия с амплитудой 65 % от максимальной. Для $M = 7,5$ определяющими являются 15 циклов с амплитудой 65 % от максимальной.

Все проведенные по программе испытания с песчаными и супесчаными образцами осуществлялись на образцах нарушенной структуры. Связность супесей настолько мала, что не позволила собирать ненарушенные образцы. Поэтому технология сборки состояла из следующих этапов:

формования в обойме сухого материала до достижения заданной плотности скелета;

предварительного вакуумирования и сборки камеры стабилометра;

подачи первой ступени давления в камеру и заполнения образца водой;

ступенчатого поднятия давления в камере и образце с контролем степени водонасыщения на каждой ступени.

Оценка динамических свойств песчаных грунтов использовала накопленный опыт по влиянию параметра K_0 на прочность и возможность разжижения. На рис. 5 приведены характерные внутрицикловые диаграммы усилий на штоке и избыточного порового давления в образце при значении параметра $K_0 = 0,75$.

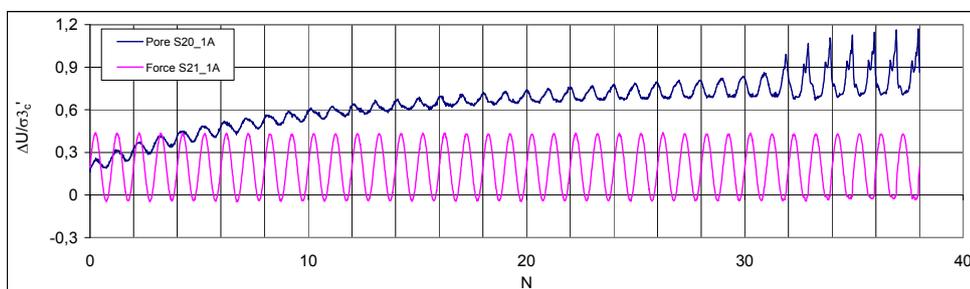


Рис. 5. Диаграмма внутрицикловых изменений порового давления и усилия на нагрузочном штоке при $K_0 = 0,75$

Результаты опытов наглядно показывают, что динамическое доуплотнение грунтов, повышение избыточного порового давления и достижение разжижения возможно лишь в условиях знакопеременного осевого нагружения. Форма кривых роста избыточного порового давления близка к арксинусу. Разрушение в этом случае представляет собой лавинообразный рост циклических осевых деформаций. Как только амплитуда осевых напряжений становится меньше статической составляющей, разрушение испытываемых образцов отсутствует. Максимальный рост избыточного порового давления составляет 20...30 % от радиальной эффективной нагрузки при консолидации. В этом случае разрушение может быть достигнуто лишь при заметном увели-

чении статической составляющей напряжений. Условием, определяющим динамическую устойчивость грунта, является близость пиковых значений напряжений к параметрам статической прочности. Форма разрушения образцов — кумулятивный набор статической составляющей осевых деформаций.

На данном этапе можно сделать консервативную оценку динамической прочности при различных условиях нагружения, предполагая основным фактором снижения прочности в несвязных и слабосвязных грунтах рост избыточного порового давления при динамическом недренированном нагружении. Характеристикой динамической прочности в этом случае выступает динамический угол трения φ_d .

Оценка потенциала разжижения несвязных грунтов при кратковременных сейсмических воздействиях основывается на методике, принятой в настоящее время в международной практике [4, 5]. Согласно этой методике вводится понятие коэффициента безопасности к разрушению для динамических воздействий (в том числе сейсмических).

Для оценки влияния динамического характера нагружения на прочностные и деформационные свойства грунтов основания нефтедобывающих платформ проведены динамические испытания на трехосных приборах и установках простого сдвига, также использовались результаты расчетного моделирования внешних воздействий — сейсмических, волновых и ледовых. Сравнение расчетных действующих напряжений с экспериментально полученными предельными напряжениями при разрушении с заданным числом циклов определяет устойчивость грунтов рассматриваемых инженерно-геологических слоев.

Опыты проводились в закрытой системе и в соответствии со стандартом ASTM D5311—2004 [6]. Они моделируют условия невозможности оттока поровой жидкости за период внешнего воздействия. Такой подход справедлив для сейсмического воздействия и обладает достаточным консерватизмом для волновых и ледовых воздействий.

Реализованная программа динамических испытаний использует накопленный опыт по влиянию уровня средних напряжений в грунте, частоты нагружения, а также соотношения независимых компонент внешних нагрузок на прочностные свойства грунтов. Это позволило оптимизировать программу, выбирая наихудшие варианты с точки зрения динамической устойчивости грунтов основания.

Максимальная глубина слоя для оценки влияния динамического характера нагружения на свойства грунтов была определена в 30 м. Такая глубина соотносится с предварительной оценкой необходимой глубины забивки свай для крепления кессонов.

В результате проведенных экспериментальных исследований по влиянию динамического характера нагружения получены данные, позволяющие спрогнозировать предельные уровни касательных напряжений в грунте с заданными параметрами средних напряжений, частоты рассматриваемого воздействия и эквивалентного числа циклов воздействия. Цифры в табл. 1 указывают на возможное снижение прочности с учетом динамики по отношению к статическим характеристикам (для несвязных грунтов $\text{tg } \varphi^d / \text{tg } \varphi$, для связных и слабосвязных Su^d / Su). Недренированная прочность на сдвиг определялась в условиях природного сложения.

Т а б л и ц а 1

Расчетные параметры динамической прочности грунтов основания сооружений при обустройстве месторождения им. В. Филановского

Инженерно-геологический слой грунтов	Значение снижения показателя грунта при циклических воздействиях, %		
	сейсмических	волновых	ледовых
Песок	20	25	5
Глина	10	15	5

Указанные параметры прочности по отношению к статическим значениям рекомендуется использовать в расчетах устойчивости сооружений при обустройстве месторождения им. В. Филановского в Каспийском море.

Мы предлагаем применять результаты данного исследования при учете результатов исследований в геологической модели геотехнического программного комплекса Plaxis 3D Foundation.

Полученные данные, характеризующие динамическую прочность несвязных и связанных грунтов при циклических (динамических) воздействиях (табл. 2), рекомендуется учитывать в геологической модели, например при расчетах свайных фундаментов платформ, проводимых с помощью геотехнического программного комплекса Plaxis 3D Foundation.

Т а б л и ц а 2

Влияние динамического воздействия на механические параметры грунта

Механические параметры грунта	Максимальные значения снижения показателя грунта при циклических воздействиях, %
Угол внутреннего трения φ Сопротивления недренамированному сдвигу S_u	25 минимальные 5, максимальные 25, средние 15

Также результаты исследования целесообразно применять при методике расчетов несущей способности свайных фундаментов.

Далее представлена методика расчета свайного фундамента платформ с учетом понижения несущей способности опорных оснований из-за влияния на них циклических воздействий.

Несущая способность F_d , кН, висячей забивной сваи, погружаемой без выемки грунта и работающей на сжимающую нагрузку, определяется согласно [7].

Одиночная свая в составе фундамента и вне его по несущей способности грунта основания рассчитывается исходя из условия

$$N \leq \frac{F_d}{\gamma_k}, \quad (1)$$

где N — расчетная вертикальная нагрузка, передаваемая на сваю; F_d — расчетная несущая способность грунта основания одиночной сваи:

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{cR} RA + u \sum \gamma_{cf} f_i h_i), \quad (2)$$

γ_k — коэффициент надежности.

Далее предлагается, согласно данным из табл. 2, для расчетов несущей способности грунтов глубины до 30 м применять следующую формулу (что, конечно же, очень консервативно, но в то же время учитывает результаты исследований, приведенных в табл. 1 и 2):

$$F_d = 0,75\gamma_c(\gamma_{cR}RA + u\Sigma\gamma_{cf}f_i h_i). \quad (3)$$

Влияние опасного свободного газа на физико-механические свойства грунта. Геологическими морскими исследованиями Северного Каспия установлено широкое распространение в грунтовом массиве скоплений мелкозалегающего свободного газа, опасного для гидротехнических сооружений, осложняющих бурение нефтегазопроисковых скважин и добычу нефти и газа.

В работах зарубежных исследователей, в частности в [8], отмечается, что при добыче нефти и газа в Северной Норвегии мелкозалегающий свободный газ создает потенциальные риски для искусственных конструкций, к которым относятся нефтяные платформы.

По результатам анализа исследований зарубежных авторов выявлено, что из-за присутствия в грунтах мелкозалегающего свободного газа механические параметры грунта также следует снижать до 20 %.

Был проведен анализ и прогноз опасных рисков для платформ и СПБУ в Каспийском море для разных месторождений, когда опасный свободный газ будет ухудшать физико-механические свойства грунта. В расчетном геотехническом программном комплексе Plaxis 3D Foundation (основанном на методе конечных элементов) моделировались грунтовые условия площадок и морское гидротехническое сооружение. Далее грунты глубиной до 30 м ухудшались до 20 % (моделировалось ухудшение прочности грунтов от воздействий опасного свободного газа). Затем к сооружениям прикладывались внешние воздействия. Результатом данного исследования явилось получение и анализ величин пенетрации и деформации грунта (осадок) без снижений физико-механических свойств грунтов и после их снижения.

Результаты исследования по снижению физико-механических свойств грунтов таковы:

для СПБУ разница величин пенетрации ее опорных ног без снижений физико-механических свойств грунтов и после снижений составили (для 10 площадок исследований) 15...23 %;

для платформ разница величин осадок свайного основания нефтяных платформ без снижений свойств грунтов и после снижений составили (для 3 площадок исследований) 19...25 %.

Комплексная оценка влияния опасного свободного газа и циклических воздействий на физико-механические свойства грунта. Был проведен анализ и прогноз опасных геологических и геодинамических рисков, когда комплексно и опасный свободный газ и циклические воздействия будут ухудшать физико-механические свойства грунтов.

Из приведенных выше исследований видно, что комплексно и опасный свободный газ и циклические воздействия будут ухудшать физико-механические свойства грунтов (до глубины 30 м):

в среднем до 35 % (средние значения снижения прочности грунтов при циклических воздействиях составляют 15 %, средние значения снижения прочности грунтов при циклических воздействиях — около 20 %);

максимально до 50 % (максимальные значения снижения прочности грунтов при циклических воздействиях составляют 25 % и максимальные значения снижения прочности грунтов при циклических воздействиях — около 25 %).

Эти данные рекомендуется использовать в расчетах устойчивости сооружений при обустройстве месторождений Каспийского моря. Следует отметить, что они носят рекомендательный характер, а для конкретной площадки требуются дополнительные исследования каждого геологического элемента.

В настоящее время в стандартах и нормах по проектированию гидротехнических сооружений и др. отмечается, что неблагоприятные свойства грунтов необходимо учитывать при наличии динамических и сейсмических воздействий [8], но не учитывается обращается внимание на снижение несущей способности грунтов от влияния на них мелкозалегающего свободного газа. В новом ГОСТ 25100—2011 [9] есть только определение термина «потенциал разжижения грунта F_L » — это показатель, имеющий смысл коэффициента запаса прочности грунта и представляющий собой отношение критического значения касательного напряжения, вызывающего разжижение грунта при данном уровне сжимающих напряжений и длительности воздействия, к значению максимальных касательных напряжений, возникающих в грунте при прогнозируемом землетрясении. Он оценивается по данным полевых и лабораторных испытаний и зависит от свойств грунта и параметров сейсмического воздействия с заданным уровнем повторяемости. Кроме того, здесь же отмечается, что по потенциалу разжижения F_L только при сейсмических воздействиях водонасыщенные песчаные грунты подразделяют на разжижаемые ($F_L \leq 1,15$) и неразжижаемые ($F_L > 1,15$).

Только о необходимости проведения испытаний грунтов на динамические исследования и использование их результатов при проектировании инженерных сооружений предусматривается действующими нормативными документами [10], но о комплексном влиянии на несущую способность грунтов динамических (сейсмических воздействий) и воздействий свободного газа в современных российских нормативных правилах ничего не сказано.

Из-за отсутствия в России стандартов, регламентирующих лабораторные динамические испытания грунтов, а также использования их результатов при проектировании, например, таких инженерных сооружений, как нефтяные платформы и др., качество и состав получаемых результатов исследований определяется только квалификацией лаборатории и людей, выполняющих данные исследования.

В связи с этим мы предлагаем подробно оценить изложенные выше проблемы и принять решение о включении учета комплексной оценки влияния опасного свободного газа и циклических воздействий на физико-механические свойства грунтов в нормативные документы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» от 21.06.1997 г. № 117-ФЗ.
2. Hight D. W., Hamza M. M., El Sayed A. S. Engineering characterization of the Nile delta clays // Coastal Geotechnical Engineering in Practice : proceedings of the International symposium, Yokohama, 20—22 September 2000. Vol. 2. P. 149—162.
3. Deepwater sample disturbance due to stress relief / T. Lunne, T. Berre, S. Strandvik, K. H. Andersen, T. I. Tjelta // Geotechnical, geological, and geophysical properties of deepwater

sediments : proceedings of 2001 Conference honoring wayne dunlap, offshore technology research center, College Station. P. 64—85.

4. *Idriss I. M., Yound T.* Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on liquefaction resistance of soils // Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering. 2001. P. 297.

5. *Seed R. B., Cetin K. O., Moss R. E. S.* Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework // 26th Annual ASCE Los Angeles geotechnical spring seminar. California, 2003. 71 p.

6. ASTM D 3999—91. Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soil using the cyclic triaxial apparatus, 1996.

7. СП 24.13330—2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03—85. М. : Минрегион развития, 2011.

8. *Hovland M.* Evidence of dynamic shallow gas hydrates at Husmus and Nyegga, off Mid-Norway // NGF Abstracts and Proceedings of the Geological Society of Norway. 2010. № 2. P. 28.

9. ГОСТ 25100—2011. Грунты. Классификация. М. : Минрегион, 2011.

10. СП 11-114—2004. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. М. : Госстрой России, 2004.

1. Federal'nyy zakon «O bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy» ot 21.06.1997 g. № 117-FZ.

2. *Hight D. W., Hamza M. M., El Sayed A. S.* Engineering characterization of the Nile delta clays // Coastal Geotechnical Engineering in Practice : proceedings of the International symposium, Yokohama, 20—22 September 2000. Vol. 2. P. 149—162.

3. Deepwater sample disturbance due to stress relief / T. Lunne, T. Berre, S. Strandvik, K. H. Andersen, T. I. Tjelta // Geotechnical, geological, and geophysical properties of deepwater sediments : proceedings of 2001 Conference honoring wayne dunlap, offshore technology research center, College Station. P. 64—85.

4. *Idriss I. M., Yound T.* Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on liquefaction resistance of soils // Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering. 2001. P. 297.

5. *Seed R. B., Cetin K. O., Moss R. E. S.* Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework // 26th Annual ASCE Los Angeles geotechnical spring seminar. California, 2003. 71 p.

6. ASTM D 3999—91. Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soil using the cyclic triaxial apparatus, 1996.

7. СП 24.13330—2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03—85. М. : Минрегион развития, 2011.

8. *Hovland M.* Evidence of dynamic shallow gas hydrates at Husmus and Nyegga, off Mid-Norway // NGF Abstracts and Proceedings of the Geological Society of Norway. 2010. № 2. P. 28.

9. ГОСТ 25100—2011. Грунты. Классификация. М. : Минрегион, 2011.

10. СП 11-114—2004. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. М. : Госстрой России, 2004.

© Маштаков А. С., 2013

Поступила в редакцию
в октябре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Маштаков А. С. Геологические и геодинамические риски, возникающие при взаимодействии нефтяных платформ с грунтом в Каспийском море // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2013. Вып. 3(28). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Mashtakov-2013_3\(28\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Mashtakov-2013_3(28).pdf)