

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОПАСНОГО СВОБОДНОГО ГАЗА  
НА МОРСКИЕ ГРУНТЫ****IMPACT EVALUATION OF DANGEROUS FREE GAS ON THE SEA SOILS**

В мировой практике нефтегазовые ресурсы континентального шельфа уже давно стали основными источниками увеличения добычи нефти и газа.

В настоящее время около 25% всей мировой добычи нефти приходится на морские месторождения. Морская добыча газа несколько меньше, но достаточно высока и составляет около 20% от общемировой.

Более 85% общих ресурсов нефти и газа российского шельфа сосредоточено в арктических морях, что предопределяет актуальность и важность научно-технического прогресса в этой области для развития нефтяной и газовой промышленности России.

По данным Минэнерго России, объем добычи нефти в Каспийском регионе к 2020 году вырастет до 200 млн т в год, газа – до 270 млрд куб. м. При таких объемах добычи вопрос экологии и безопасности производства должен стать основным.

Следует отметить тот факт, что освоение шельфовых ресурсов является небезопасным, поэтому перед нефтегазовой индустрией стоит важная задача – обеспечить безопасную эксплуатацию платформ на шельфе.

Морские нефтегазопромысловые сооружения и самоподъемные плавучие буровые установки характеризуются высокой аварийностью при эксплуатации.

К составляющим общей угрозы безопасности освоения морских нефтегазовых месторождений отнесены: опасные процессы в геологической среде; нештатные технологические процессы; опасности техногенного происхождения и другие. В данной статье рассмотрены некоторые геологические явления в грунтах, которые снижают их прочность, поэтому негативное влияние свободного газа на грунты создает потенциальный риск в районах интенсивной нефтегазодобычи в Каспийском море. В статье приведены некоторые аспекты инженерно-геологических опасностей, которые следует учитывать при освоении нефтегазовых месторождений.

In the world practice oil and gas resources of a continental shelf have long become the main sources of the enhanced oil and gas production.

At present about 25% of the whole world oil production is related to the sea deposits. The gas production is a little less but is rather high and makes up about 20% of the worldwide one.

More than 85% of the total resources of the Russian shelf oil and gas are concentrated in the Arctic seas that predetermine the actuality and importance of scientific and technical progress in this branch for the Russian oil and gas industry development.

According to the Russian Minenergo data, the volume of oil production in the Caspian region by the end of 2020 will have grown up to 200 mln t per year, gas - up to 270 bln t cubic meters. With such production volumes the ecological and production safety problems must have a priority.

It is worth noting the fact that exploration of the shelf resources is not safe that's why the oil and gas industry faces an important problem – the provision of a safe exploitation of the platforms on the shelf.

The maritime oil and gas constructions and self-elevating floating rigs are characterized by a high accident risk in exploitation.

To the constituents of the common safety danger of the sea oil and gas deposits' exploration belong: dangerous processes in the geological environment; emergency technological processes, dangers of a technogenic origin and others. In this article some geological phenomena in the soils which decrease their strength have been dealt with that's why a negative impact of a free gas on the soils generates a potential risk in the intensive oil and gas production regions in the Caspian Sea. In the article some aspects of engineering and geological dangers which should be taken into account in the oil and gas deposits' exploration have been given.

**Маштаков А. С.**

**«ВолгоградНИПИморнефть»,  
Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-  
Инжиниринг», г. Волгоград,  
Российская Федерация**

**A. S. Mashtakov**

**«VolgogradNIPImorneft» Branch of  
LLC «LUKOIL-Engineering»,  
Volgograd, the Russian Federation**

**Ключевые слова:** инженерно-геологические аспекты, мелкозалегающий свободный газ, Каспийское море, нефтяные платформы, самоподъемные буровые установки.

**Key words:** engineering and geological aspects, shallow free gas, the Caspian Sea, oil platforms, self-elevating rigs.

В настоящее время исследователи обсуждают на различных конференциях проблемы, связанные с

присутствием опасного свободного газа в верхней части грунтов в разных регионах шельфа и материковых областей, а также публикуют результаты своих исследований [1-8]. Следует заметить, что проблема наличия свободного газа в морских грунтах широко освещена в зарубежных источниках [9-20].

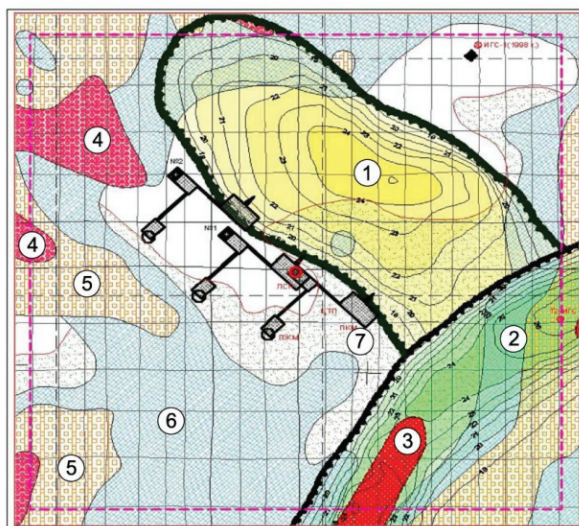
В результате выполненных инженерно-геологических изысканий морских грунтов Каспийского моря выявлены признаки того, что распространя-

ются, причем очень широко в массиве грунта, скопления, так называемого «опасного свободного газа». Данный газ осложняет и бурение скважин при нефтегазопоиске (часто происходят выбросы газа при бурении скважин), и эксплуатацию нефтегазопромысловых сооружений (так как «опасный газ» понижает прочностные параметры грунтового основания сооружений). Как пример скопления газа можно рассмотреть сейсмические аномалии, либо высокоамплитудные отражения, так называемые «яркие пятна», интерпретировать которые можно как «газовые карманы».

Районы скопления газа отмечаются у самой поверхности дна внутри палеоложбин, выполненных «мангышлакскими» отложениями.

Газ данного стратиграфического уровня является автохтонным, генетически связанным с захороненным в этих палеоформах органическим материалом и относится к типу озерно-болотного.

По результатам исследований, Ю.П. Безродных составил и опубликовал в работе [2] карту распространения «геологических опасностей» на участке проектируемого обустройства одного из нефтегазовых месторождений (рисунок 1).



**Рисунок 1.** Карта распространения «геологических опасностей» на участке проектируемого обустройства одного из нефтегазовых месторождений с вариантами размещения промысловых сооружений:

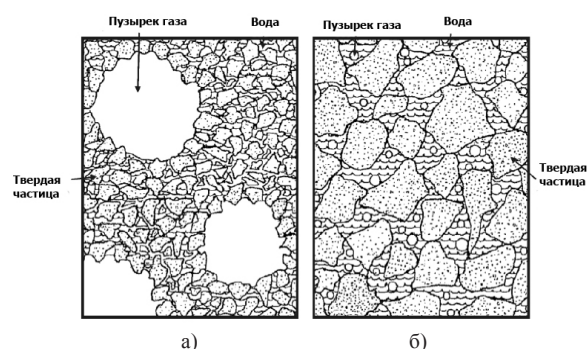
1 – погребенное палеопонижение 2 – рассекающий его палеоврез с залежами «слабых» глинистых грунтов 3-7 – скопления свободного (защемленного) газа на разных гипсометрических уровнях

Газ в грунтах может находиться как газ, растворенный в поровой воде (т.е. газ недонасыщен в поровой воде), как свободный газ (т.е. газ перенасыщен в поровой воде) или как газогидрат (т.е. газ заключен в клатраты) [17, 3].

В дальнейшем газогидраты не обсуждаются, так как условия (высокое давление, низкая температура), в которых они стабильны - не встречаются на участке

строительства платформ. Свободный газ может встречаться в случае, если объем газа превышает максимальный объем газа, который может быть растворен в поровой воде при определенном давлении и температуре. Если водонасыщенность в порах превышает 85%, т.е. водная фаза однородна, а газовая фаза неоднородна, в грунтах свободный газ образует разрозненные пузырьки (так называемый газосодержащий грунт) [3]. Газосодержащий грунт схематически представлен на рисунке 2.

Диаметр пузырьков газа в газосодержащих грунтах колеблется от 0,5 до 50 мм. Пузырьки газа в мелкозернистых грунтах (т.е. глинах и илах) значительно больше, чем частицы грунта и размеры обычного порового пространства. Формация свободного газа в мелкозернистых грунтах обычно создает значительные полости в структуре грунта, как показано на рисунке 2 а [20].



**Рисунок 2.** Схематическое представление газосодержащего грунта:

а) – структура грунта, содержащего пузырьки газа значительно большего размера, чем твердые частицы (например, глины или ила); б) – структура грунта, содержащего пузырьки газа гораздо меньшего размера, чем твердые частицы (например, пески)

В чисто грубозернистых грунтах (т.е. песках без вторичных компонентов) пузырьки газа обычно меньше размера частиц и полностью содержатся в жидкости в поровом пространстве, как показано на рисунке 2 б [20].

Миграция пузырьков газа с потоком поровой воды или под влиянием плавучести не изменяет структуру грубозернистых грунтов так, как это происходит с мелкозернистыми грунтами. Грубозернистые грунты, следовательно, представляются более стабильными в случае миграции пузырьков газа, чем мелкозернистые грунты.

Присутствие свободного газа может по-разному оказывать влияние на поведение уплотнения грунта. Оно явно сокращает плотность и увеличивает объем данной массы грунтов, которую он может занимать. Следовательно, если уплотнение под собственным весом грунтов, содержащих газ, сопоставимо с уплотнением насыщенного грунта, содержащего ту же массу воды и твердых веществ, то сокращенная объемная плотность вызывает меньшую движущую

силу для уплотнения и меньшее начальное избыточное давление в поровой воде.

После моделирования разных ситуаций в программных комплексах можно сделать следующие выводы: воздействие пузырьков газа на недренированную прочность на сдвиг было наиболее разрушительным при низких значениях рабочего напряжения (соответствующих небольшой глубине под морским дном) и высоких значениях общих нагрузок (соответствующих глубоководному расположению).

Выбросы газа могут наблюдаться во время непрерывного бурения. На этапе бурения давление в забое скважины тесно связано с весом толщи воды в бурительной трубе или немного выше (в зависимости от напора воды над уровнем моря). В теории, если давление газа равняется гидростатическому давлению, процесс бурения изменяет общее давление. Часто выбросы «газоводяной смеси» стимулируются при проведении подобных специальных работ, таких, как поднятие бурительной трубы, поднятие штанг СРТ (статическое зондирование) или начало извлечения пробных образцов. Отдельный газ способствует созданию пузырьков внутри колонки и возможно в кольцевом пространстве. Разделение газа может привести к неконтролируемым выбросам газа снаружи буровой трубы.

*Воздействие разгрузки на поведение сжатия газосодержащих пород*

В 2002 г. D.W. Hight и др. опубликовали результаты серии испытаний стандартным консолидометром с целью показать воздействие выделения газа на поведение сжатия глин в дельте р. Нил [10]. На рисунке 3 показано воздействие выделения газа на поведение сжатия глин в зависимости от глубины залегания грунтов от дна реки.

Газы в порах грунтов могут находиться в свободном, адсорбированном, зацементированном и растворенном состояниях. В данном исследовании изучался именно «свободный газ». Свободные газы содержатся в сообщающихся порах грунта, их количество зависит от открытой пористости грунта и степени его водонасыщения  $S_r$  ( $S_r$  – степень влажности грунтов, которая показывает степень его насыщения влагой, выражается в процентах от 0% (абсолютно сухой грунт) до 100%, либо в долях от 0 до 1). Следует заметить, от влажности грунта зависят его другие характеристики, в первую очередь его несущая способность. У всех грунтов с повышением влажности несущая способность уменьшается, исключение составляют только крупнообломочные породы и крупный гравелистый песок.

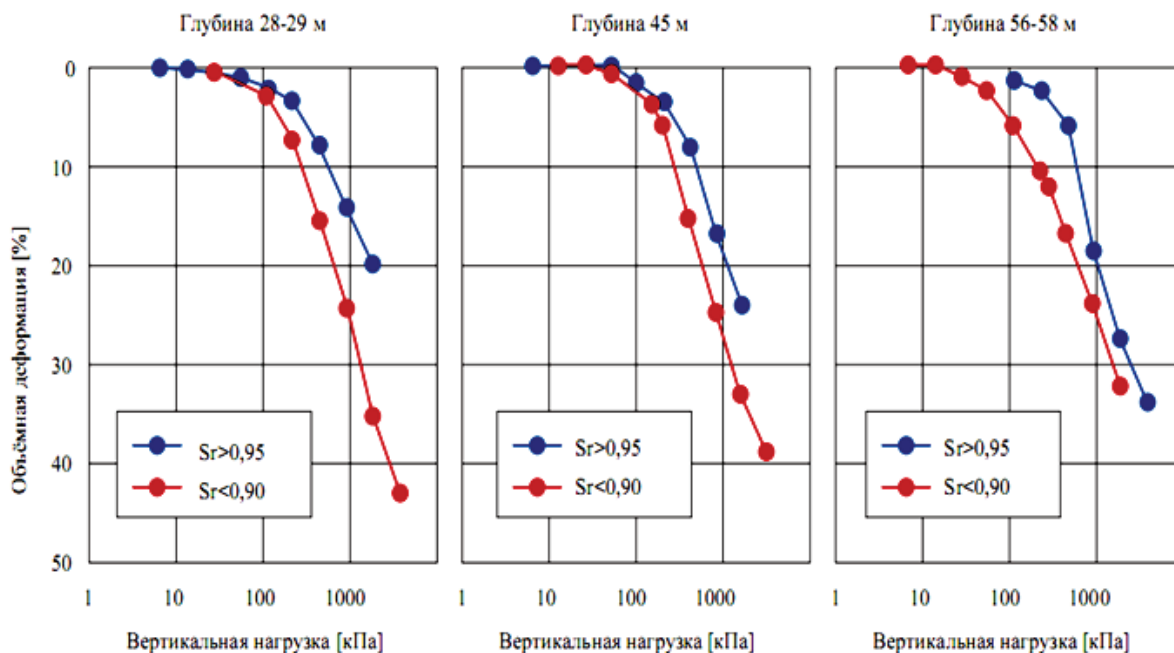


Рисунок 3. Воздействие выделения газа на поведение сжатия глин

Из рисунка 3 можно выявить закономерность: чем выше содержание газа, тем выше сжимаемость (объемная деформация) до тех пор, пока кривые сжатия не становятся практически параллельными после того, как газовые пузырьки лопаются. Также из рисунка 3 видно, что при более значительных нагрузках (1000 кПа) со степенью влажности грунтов  $S_r > 0,95$  объемная деформация увеличивается с глубиной.

На глубине 56-58 м на начальной стадии деформации грунта с максимальной степенью водонасыщенности, получают максимальные деформации (что значительно отличается от поведения грунта на глубинах менее 56 м., где кривые сжатия с  $S_r > 0,95$  и  $S_r < 0,95$  отличаются мало). Воздействие выделения газа на поведение сжатия глин происходит по закономерности: чем выше содержание газа, тем выше сжимаемость до тех пор, пока кривые сжатия не становятся практически параллельными после того, как газовые пузырьки лопаются (происходит «разгрузка» - разделение и расширение газа) [10].

Впервые экспериментально снижение предуплотняющего давления с содержанием газа было замечено Lunne T. в 2001 г. [12]. D.W. Hight и S. Leroueil в 2003 г. пришли к заключению, что газы, впервые выделившиеся в самых широких порах отложений, повреждают связи вокруг этих пор [11]. В этом случае выход происходит ранее, чем в неповрежденных отложениях.

### Влияние разгрузки на недренированную прочность на сдвиг

Что касается испытаний консолидометром, степень газонасыщенности образцов варьировалась от 0 до 1 (т.е. начально-растворенный газ), затем была произведена разгрузка, чтобы смоделировать разделение газа при взятии образцов керна. Влияние разделения газа на результаты трехосных испытаний, проведенных на глинах (рисунок 4 а), как вызывающие уменьшение прочности на сдвиг с увеличением степени газонасыщенности. Выявлено, что деструктуризация по причине разделения газа также приводит к характерному изменению траектории эффективного напряжения (рисунок 4б) [12]. Об этом говорит неравномерность траектории эффективного напряжения при быстром увеличении избыточного порового давления и отсутствии увеличения напряжения сдвига (рисунок 4 б).

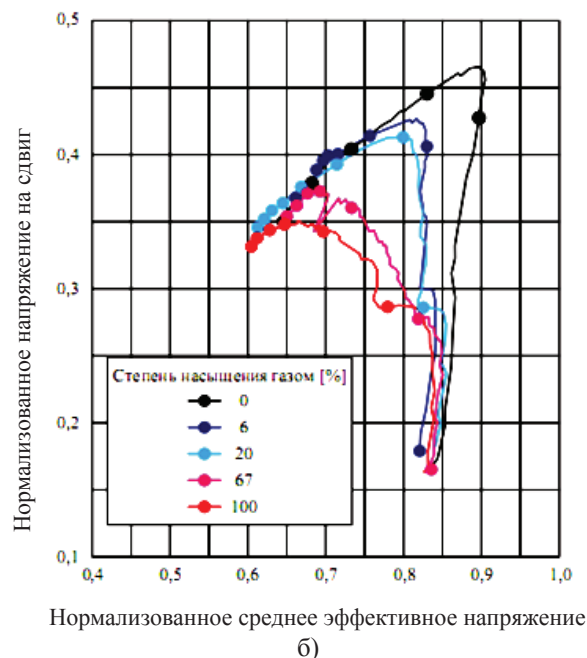
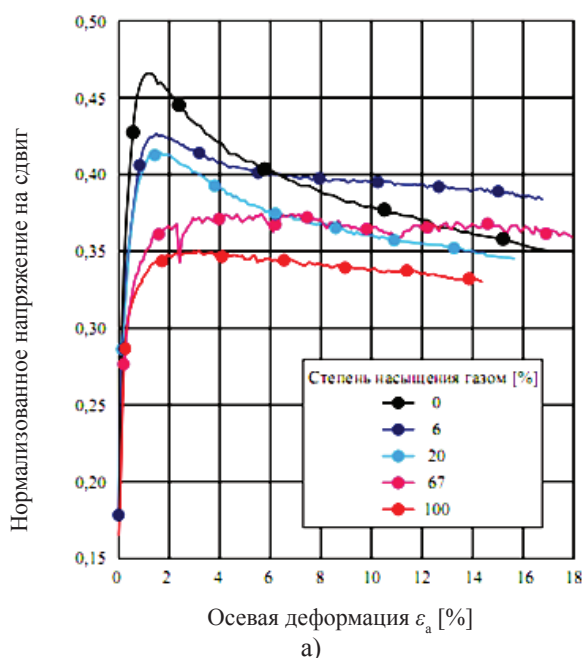
Нормализованное среднее эффективное напряжение определяется по следующей формуле:

$$[(\sigma_a + \sigma_r) / 2] / \sigma'_{ac}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_a$  – осевая деформация;  $\sigma_a$  – активное напряжение;  $\sigma_r$  – нормализованное напряжение;  $\sigma'_{ac}$  – эффективное напряжение.

Нормализованное напряжение на сдвиг определяется по следующей формуле:

$$[(\sigma_a - \sigma_r) / 2] / \sigma'_{ac} \quad (2)$$



**Рисунок 4.** Влияние разделения газа на результаты трехосных испытаний:  
а) кривые зависимости напряжения от растяжения  
б) траектории эффективной нагрузки

Согласно рисунку 4б [12] протяженность этой неравномерности растёт с начальной степенью газонасыщенности и, следовательно, со степенью разрушения. Похожая неравномерность траектории эффективной нагрузки – при недреннированном сдвиге во время трехосного сжатия образцов глины, и предполагается, что подобное характерное изменение соответствует обрушению пор, расширенных разделением газа [12].

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- и мелкозернистые и грубозернистые газосодержащие отложения демонстрируют сильное сокращение эффективного напряжения при недреннированной нагрузке. Параметры, определяющие подобные характеристики, включают пластовое состояние нагрузки, давление насыщения жидкости газом, растворимость газа, степень водонасыщенности и сжимаемости твердых и жидких составляющих отложения;

- на прочность мелкозернистых газосодержащих отложений и последующее уплотнение при напряжениях на сдвиг влияет разрушение, вызванное сформировавшейся структурой отложений при разделении;

- рыхлые газосодержащие пески с начальной степенью насыщения большей, чем 0,9 демонстрируют реакцию на недреннированный сдвиг, похожую степень насыщения столь же рыхлых, полностью насыщенных песков (деформационное разуплотнение). Ниже значения насыщения в 0,9 подобная реакция изменяется в сторону значения насыщения полностью насыщенных рыхлых песков в дренированных условиях (деформационное уплотнение);

- что касается плотных газосодержащих песков то, чем выше содержание газа, тем слабее образец по причине разделения и расширения газа.

Зарубежный исследователь S.D.Thomas провел серию одномерных испытаний на уплотнение на восстановленных образцах устьевых илистых глин, сделанных газосодержащими, путем добавления метаносодержащих цеолитов [18]. Результаты этих испытаний показали, что начальные приложения нагрузки в недреннированных условиях вызвали незамедлительные изменения общего коэффициента пустотности и пустотности по газу. S.D. Thomas отметил, что изменения в объеме газа связаны исключительно с изменениями общего напряжения, и не изменяются дренажем воды во время уплотнения [18]. Он также подчеркнул, что поведение структуры почвы зависит от разницы напряжения в грунтах.

S.J. Wheeler пришел к выводу, что воздействие пузырьков газа на недреннированную прочность на сдвиг было наиболее разрушительным при низких значениях рабочего напряжения (соответствующих небольшой глубине под морским дном) и высоких значениях общей нагрузки [18-20].

Зарубежный исследователь S. Pietruszczak реализовал программу опытов, состоящую из серии дренированных и недреннированных испытаний на трёхосное сжатие на песке. В результате прочность грунтов уменьшилась до ~13% [14].

Было выявлено, что из-за своей тенденции к расширению плотные пески при сдвиге испытывают падение давления поровой воды. Тогда как в условиях полного насыщения это приводит к высокой недреннированной прочности, в газосодержащем песке это может вызвать расширение газа, таким образом, ограничивая падение давления поровой воды, которое песок может поддерживать до образования пустот.

На основании испытаний на трехосное сжатие, проведенных на плотном песке, распределение размерности частиц, типичных для песков Северного моря (т.е.  $D_{50}$  около 0,14 мм), G.C.Sills показал, что данное воздействие может быть значительным. Например, при испытании песков при давлениях, эквивалентных глубине воды в 40 м, с  $S_r$  до 0,99, недреннированная прочность уменьшилась до ~60%, до похожей недреннированной прочности, но полностью насыщенных плотных песков [9].

В результате анализа перечисленных выше фактов, а также исследований зарубежных авторов [9-20], автором исследования принято значение понижения прочности грунтов (в процентном отношении) в результате воздействия на него «опасного мелкозалегающего газа» – 20% (максимальное значение из диапазона от 10% до 20%). Данное значение имеет запас прочности, что приветствуется в проектировании таких ответственных сооружений, как морские стационарные сооружения (МСП) и самоподъемные плавучие буровые установки (СПБУ). Следует заметить, что морские нефтегазопромысловые сооружения – имеют 1 класс ответственности, что говорит о больших рисках при их эксплуатации. Поэтому возможные снижения прочностных характеристик грунтов, которые являются основанием для таких сооружений, повлияют на безопасность их эксплуатации, и могут привести к аварийным ситуациям. Согласно изложенному выше, автор считает обоснованным решением принимать значение понижения прочности грунтов – 20%.

### Выводы

В районе Каспийского моря отмечены скопления газа в грунтах только в придонном слое (по анализам сейсмоакустического профилирования). В целом насыщенность грунтов газом является фактором, осложняющим инженерно-геологические условия. Данный факт также необходимо учитывать при расчетах несущей способности свайных фундаментов МСП и опорных колонн СПБУ. Следовательно, неправильно принятые решения по методике расчетов опорных колонн СПБУ, либо опорного основания нефтяных платформ (МСП) могут повлиять на безопасность эксплуатации сооружений на шельфе.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Безродных Ю. П., Делия С. В., Лисин В. П. Применение сейсмоакустических и сейсмических методов для изучения газоносности грунтов Северного Каспия // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2001. №5. С. 476-480.
- 2 Безродных Ю. П. Инженерно-геологические изыскания, выполняемые на акватории Каспийского моря // Инженерные изыскания. 2014. № 4. С. 54-58.
- 3 Маштаков А. С. Оценка комплексного влияния на несущую способность грунтов циклических воздействий и мелкозалегающего свободного газа // Альтернативная энергетика и экология. 2013. №11. С. 33-36.
- 4 Маштаков А. С. Анализ комплексного влияния геологических процессов и геодинамических воздействий на несущую способность свайных фундаментов нефтяных платформ, устанавливаемых на шельфе Каспийского моря // Инженерная геология. 2014. № 2. С. 44-53.
- 5 Тарасов Г. А., Рокос С. И. Газонасыщенные осадки губ и заливов южной части Карского моря // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 2007. № 67. С. 66-75.
- 6 Тарасов Г. А., Рокос С. И. О признаках газопроявлений в новейших отложениях Баренцево-Карского шельфа // Доклады Академии наук. 2008. Т. 418, № 3. С. 361-365.
- 7 Миронюк С. Г. Локализация приповерхностных зон скопления газа (газовых карманов и труб) геофизическими методами и оценка их опасности для морских сооружений // ТЭК. Безопасность. 2013. № 2. С. 74-79.
- 8 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.
- 9 Behaviour of Offshore Soils Containing Gas Bubbles / G.C. Sills, S.J., Wheeler S.D. Thomas, T.N. Gardner // Geotechnique. 1991. Vol. 41, № 2. P. 227-241.
- 10 Hight D.W. Engineering Characterization of the Nile Delta Clays / D.W. Hight, M.M. Hamzaand, A.S. El Sayed // Coastal Geotechnical Engineering in Practice: Proceedings of the International Symposium, IS-Yokohama 2000, Yokohama, Japan, 20-22 Sept. 2000. Rotterdam, 2002. Vol. 2. P. 149-162.
- 11 Lunne T. Deepwater Sample Disturbance due to Stress Relief / T. Lunne, T. Berre, S. Strandviet // Geotechnical, Geological and Geophysical Properties of Deepwater Sediments: Proceedings of 2001 Conference Honoring Wayne Dunlap. Houston, 2001. P. 64-85.
- 12 Orlob G.T. The Effect of Entrapped Gases on the Hydraulic Characteristics of Porous Media / G.T. Orlob, G.N. Radhakrishna // Transactions of the American Geophysical Union. 1958. Vol. 39, № 4. P. 648-659.
- 13 Pietruszczak S.A. Hypothesis for Mitigation of Risk of Liquefaction / S.A. Pietruszczak, G.N. Pande, M.Oulapour // Géotechnique. 2003. Vol. 53, № 9. P. 833-838.
- 14 Rad N.S. Gas in Soils. II: Effect of Gas on Undrained Static and Cyclic Strength of Sand / N.S.Rad, A.J.D. Vianna, T. Berre // Journal of Geotechnical Engineering. 1994. Vol. 120, № 4. P. 716-736.
- 15 Reinemann D.J. Theory of Small-diameter Airlift Pumps / D.J.Reinemann, J.Y. Parlange, M.B. Timmons // International Journal of Multiphase Flow. 1990. Vol. 16, № 1. P. 113-122.
- 16 Sills G.C. The Significance of Gas for Offshore Operations / G.C. Sills, S.J. Wheeler // Continental Shelf Research. 1992. Vol. 12, № 10. P. 1239-1250.
- 17 Thomas S.D. The Consolidation Behaviour of Gassy Soil / S.D. Thomas.-Trinity. 1987. 264 p.
- 18 Wheeler S.J. The Stress-strain Behaviour of Soils Containing Gas Bubbles / S.J.Wheeler. Hilary. 1986. 257 p.
- 19 Wheeler S.J. The Undrained Shear Strength of Soils Containing Large Gas Bubbles / S.J. Wheeler // Géotechnique. 1988. Vol. 38, № 3. P. 399-413.
- 20 Wheeler S.J. A Conceptual Model for Soils Containing Large Gas Bubbles / S.J. Wheeler // Géotechnique. 1988. Vol. 38, № 3. P. 389-397.

## REFERENCES

J.Y. Parlange, M.B. Timmons // International Journal of Multiphase Flow. 1990. Vol. 16, № 1. P. 113-122.

16 Sills G. C. The Significance of Gas for Offshore Operations / G.C. Sills, S.J. Wheeler // Continental Shelf Research. 1992. Vol. 12, № 10. P. 1239-1250.

17 Thomas S.D. The Consolidation Behaviour of Gassy Soil / S.D. Thomas.-Trinity. 1987. 264 p.

18 Wheeler S. J. The Stress-strain Behaviour of Soils Containing Gas Bubbles / S.J.Wheeler. Hilary. 1986. 257 p.

19 Wheeler S. J. The Undrained Shear Strength of Soils Containing Large Gas Bubbles / S.J. Wheeler // Géotechnique. 1988. Vol. 38, № 3. P. 399-413.

20 Wheeler S. J. A Conceptual Model for Soils Containing Large Gas Bubbles / S.J. Wheeler // Géotechnique. 1988. Vol. 38, № 3. P. 389-397.

*Маштаков А. С., главный специалист отдела перспективных морских проектов и управления базами данных, «Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ВолгоградНИПИморнефть» в г.*

*Волгограде», г. Волгоград, Российская Федерация*

*A. S. Mashtakov, Chief Specialist, Department of Perspective offshore Projects and Management of Databases, LUKOIL-Engineering limited VolgogradNIPImorнеft Branch Office in Volgograd, Volgograd the Russian Federation  
e-mail: mashtakovas1987@Qip.ru*