

# ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СЛАБЫХ ГРУНТОВ ПРИ ОБУСТРОЙСТВЕ МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВЫХ СООРУЖЕНИЙ И ОБЪЕКТОВ БЕРЕГОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ШЕЛЬФЕ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

УДК 553.981.2

**С.И. Голубин**, к.т.н., ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (Москва, РФ),  
S\_Golubin@vniigaz.gazprom.ru

**К.Н. Савельев**, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», K\_Saveliev@vniigaz.gazprom.ru

Разработка и обустройство нефтегазовых месторождений шельфа Дальнего Востока ведутся в особо сложных природно-климатических и инженерно-геологических условиях. Эти условия налагают особые требования на проектирование и строительство объектов освоения. В статье освещается современное состояние вопроса технической мелиорации грунтов в свете решаемых задач. Рассматривается технология механического глубинного перемешивания грунтов DeepSoilMixing (DSM), применяемая для укрепления слабых грунтов при проектировании и строительстве морских нефтегазопромысловых сооружений и объектов береговой инфраструктуры. Наиболее острый и актуальный при использовании технологии DSM вопрос – снижение расхода цемента (основного вяжущего вещества) при сохранении качества «усиления» грунтов. Авторами статьи предлагается использовать для достижения этой цели добавки из синтетических цеолитов, фактически переработанные отходы производства и применения абсорбентов. Предложение подкрепляется результатами лабораторных исследований, которые провели авторы статьи.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ШЕЛЬФ, ОБУСТРОЙСТВО МЕСТОРОЖДЕНИЙ, УКРЕПЛЕНИЕ ГРУНТОВ, МЕХАНИЧЕСКОЕ СМЕШИВАНИЕ, ЦЕМЕНТ, СИНТЕТИЧЕСКИЕ ЦЕОЛИТЫ, ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕЛИОРАЦИЯ ГРУНТОВ.

Проектирование и строительство морских нефтегазопромысловых сооружений и объектов береговой инфраструктуры на шельфе Дальнего Востока, несмотря на значительный прогресс в этой области, продолжает оставаться сложной инженерно-технической задачей.

Трудности освоения шельфа Дальнего Востока связаны с множеством факторов. Помимо того что Дальний Восток является уникальной природной территорией, требующей сохранения по экологическим показателям, с инженерной точки зрения освоение шельфовых месторождений

сопряжено со следующими проблемами:


- сложные инженерно-геологические и природно-климатические условия;
- сложные гидрологические условия;
- сложные ледовые условия (для континентального шельфа о. Сахалин);
- высокая сейсмичность;
- удаленность и изолированность объектов обустройства и строительства.

Одной из наиболее острых проблем, сопряженных со сложными инженерно-геологическими условиями, является проблема

слабых грунтов. Заболоченность и обводненность прибрежной территории, генезис и условия формирования грунтовых отложений накладывают негативный отпечаток на их свойства. Как правило, такие грунты представляют собой не получившие в естественных условиях их формирования достаточного уплотнения мелкодисперсные песчаные, глинистые отложения и илы с большим содержанием органики. Слабые грунты могут встречаться как локально, так и иметь значительное распространение по площади, в разрезе такие грунты могут залегать как в виде локальных линз, так и в виде напластований мощностью до 20–30 м.

К негативным свойствам таких грунтов можно отнести:

- низкую прочность;



В ГЕОФИЗИКЕ ТЕРМИН IN SITU ОБОЗНАЧАЕТ ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТОВ И ИЗМЕРЕНИЙ НЕПОСРЕДСТВЕННО В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ СВОЙСТВ И СОСТОЯНИЯ В ЕСТЕСТВЕННОМ ЗАЛЕГАНИИ.

**Golubin S.I.**, Ph.D. in Engineering Science, Gazprom VNIIGAZ, LLC (Moscow, RF), S\_Golubin@vniigaz.gazprom.ru

**Savelyev K.N.**, Gazprom VNIIGAZ, LLC, K\_Savelyev@vniigaz.gazprom.ru

### Increasing the strength of soft grounds when developing water oil and gas field structures and facilities of the coastline infrastructure at the far East Shelf

Arrangement and development of oil and gas fields at the Far East shelf are carried out in extremely difficult natural and climatic, engineering and geological conditions. The conditions impose special requirements to the design and construction of development targets. The article presents the current state of soil engineering amelioration in the light of the tasks in hand. The article considers a deep soil mixing technology (DSM) which is used to strengthen soft soils when designing and constructing water oil and gas field structures and facilities of the coastline infrastructure. The most topical and critical issue for using the DSM technology lies in decreasing the cement consumption (with cement being the main bounding agent), at the same time preserving the quality of "strengthened" soils. To achieve this goal, the authors propose to use additives from synthetic zeolites which are basically recycled absorbent production and use waste. The proposal is supported by the results of laboratory research carried out by the authors.

**KEY WORDS:** SHELF, FIELD DEVELOPMENT, SOIL STRENGTHENING, MECHANICAL MIXING, CEMENT, SYNTHETIC ZEOLITES, SOIL ENGINEERING AMELIORATION.

- высокую пористость;
- сильную сжимаемость;
- длительную консолидацию во времени;
- склонность к разжижению при динамических и гидродинамических нагрузках, а также землетрясениях интенсивностью более шести баллов [1].

В то же время при проектировании и строительстве морских нефтегазопромысловых сооружений и объектов береговой инфраструктуры к основаниям и фундаментам предъявляются высокие требования надежности, обусловленные технологическими требованиями, а также необходимостью безопасной и безаварийной эксплуатации. К основаниям и фундаментам предъявляются такие требования, как:

- высокая несущая способность;
- обеспечение общей устойчивости сооружения с учетом сейсмических воздействий;
- минимизация либо исключение осадок;
- минимизация либо исключение горизонтальных перемещений и кренов.

В такой ситуации использование грунтов с низкими прочностными и деформационными характеристиками в качестве оснований нефтегазопромы-

ловых сооружений и объектов береговой инфраструктуры без специальных технических и конструктивных решений недопустимо, так как может приводить к значительным деформациям, потере устойчивости сооружения и, как следствие, к аварии.

Создание надежного основания является залогом нормальной эксплуатации нефтегазопромысловых сооружений и объектов береговой инфраструктуры на всех стадиях жизненного цикла.

В отечественной практике проектирования и строительства для создания подобных оснований прибегают к проверенным, надежным и понятным с точки зрения

инженера техническим решениям.

К ним относятся:

- применение свайных и свайно-плитных фундаментов, прорезающих всю толщу слабых грунтов;
- замена слабых грунтов на грунты с требуемыми проектом строительными свойствами (грунтовые подушки).

Если применение свайных и свайно-плитных фундаментов является надежным, а порой и единственно возможным решением при устройстве оснований, то замена грунтов не всегда может быть оправданна как с инженерной, так и с экологической и экономической точек зрения.





Рис. 1. Завод и отгрузочный терминал СПГ Sabine Pass, общий вид.  
Фото: [www.cheniere.com](http://www.cheniere.com)



Рис. 2. Устройство основания из грунтоцементных свай при строительстве резервуарного парка в порту Bandar Abbas, Иран. Фото: [www.omranista.com](http://www.omranista.com)

В настоящее время в мире приобрели популярность и показали свою эффективность методы укрепления грунтов в массиве – *in situ*. Данные методы позволяют повысить прочность, несущую способность и устойчивость слабых грунтов к сейсмическим воздействиям непосредственно на месте производства работ без необходимости их выемки и замены.

Наибольшую популярность в мире приобрела технология механического глубинного перемешивания грунтов Deep Soil Mixing (DSM). Данная технология позволяет держать высокий темп

производства работ и получать при этом укрепленные массивы грунта и различные грунтовые элементы с высокой прочностью, несущей способностью, надежностью и долговечностью. Основным строительным материалом при этом является такое вяжущее вещество, как цемент. Технология была разработана в Японии [2, 3] еще в 1975 г. и применялась для создания оснований прибрежных площадных объектов, портов, отгрузочных терминалов и различных гидротехнических сооружений на мелководном шельфе. Позже технология успешно стала

применяться в США, Европе [4] и далее по всему миру. Широкое применение DSM сдерживалось в основном отсутствием строительной техники, способной выполнять укрепление грунтов по данной технологии. В настоящее время необходимое оборудование выпускается многими ведущими производителями строительной техники и позволяет укреплять грунты до глубины 50 м с диаметром отдельных грунтоцементных элементов до 2 м. Так, к примеру, при строительстве завода и отгрузочного терминала СПГ Sabine Pass в США (рис. 1) укрепление грунтов по технологии DSM выполнялось на площади около 400 га, в том числе и под резервуарами СПГ. При строительстве резервуарного парка в Иране, порт Bandar Abbas (рис. 2), под резервуары для хранения нефти объемом 15000 м<sup>3</sup> каждый было выполнено общее основание из 1000 грунтоцементных свай диаметром 1,3 м по технологии Deep Soil Mixing. Данная технология активно применяется и во многих странах Азиатско-Тихоокеанского региона, в том числе в Китае и Южной Корее. Так, при строительстве резервуарного парка в Южнокорейском порту Ulsan (рис. 3) укрепление грунтов тоже выполнялось по технологии глубинного перемешивания.

Несмотря на значительный прогресс в области укрепления грунтов по технологии механического смешивания и, казалось бы, доведенного до идеала технологического процесса, актуальным остается вопрос возможности уменьшения расхода цемента как основного строительного материала без снижения конечной прочности укрепляемого грунта. Стоит также отметить, что увеличение расхода цемента, вносимого в укрепляемый грунт в целях повышения его конечной прочности, не всегда приводит к ожидаемому результату. Не вызывает сомнений, что на процессы гидратации, кинетику твердения и конечную



прочность цементогрунта влияют тип и минералогический состав укрепляемых грунтов.

В настоящее время в целях положительного влияния на грунты, укрепляемые по технологии DSM, разрабатываются и применяются различные химические добавки, позволяющие снизить расход вяжущего вещества на единицу объема укрепляемого грунта без потери его прочности либо повысить прочность укрепляемого грунта без необходимости увеличения расхода цемента, что, в свою очередь, повлияет на уменьшение стоимости работ по укреплению грунтов за счет снижения расхода основного строительного материала.

С этой целью авторами был проведен ряд исследований, ориентированных на изучение влияния на прочность грунтов комплексной добавки, основой которой являются синтетические цеолиты. Предпосылки исследований, цели и задачи были сформулированы авторами в отдельной статье [5].

Цеолиты широко применяются в газовой промышленности как адсорбенты для осушки природного газа. Уровень современного промышленного производства и потребления синтетических цеолитов в России достигает нескольких сотен тысяч тонн в год. В результате производства и применения синтетических цеолитов образуются многотонные отходы отработанных материалов, некондиционных цеолитовых гранул и цеолитовой крошки, что ставит вопрос о необходимости их утилизации либо переработки для дальнейшего применения [6].

Цеолиты – кристаллические водные алюмосиликаты щелочных или щелочноземельных металлов, соответствующие формуле  $MeO \cdot Al_2O_3 \cdot nSiO_2 \cdot H_2O$  (где Me – ион металла). Они характеризуются рыхлой структурой с широкими каналами и полостями на уровне кристаллической решетки, что обуславливает уникальность их свойств: молекулярно-ситовой эффект, высокую ионообменную,



Рис. 3. Резервуарный парк в порту Ulsan, общий вид. Фото: www.worldmaritimeneews.com

Результаты испытаний по определению прочности на одноосное сжатие

Образец	Время выдержки образцов, сут	
	3	28
	Прочность на одноосное сжатие, МПа	
Суглинок + цемент 10 %	0,532	2,110
Суглинок + цемент 15 %	0,614	2,320
Суглинок + цемент 10 % + добавка 1 %	0,724	2,420
Супесь + цемент 10 %	1,120	3,120
Супесь + цемент 15 %	1,420	3,890
Супесь + цемент 10 % + добавка 1 %	1,680	4,480
Песок + цемент 10 %	1,485	6,183
Песок + цемент 15 %	1,596	6,890
Песок + цемент 10 % + добавка 1 %	1,984	7,622

сорбционную и каталитическую способности. Для проведения лабораторных исследований была приготовлена опытная добавка. В качестве основного компонента добавки был выбран синтетический цеолит типа NaX (наиболее распространенный тип синтетических цеолитов, производимый отечественной промышленностью), а также дополнительные компоненты – активаторы твердения в виде хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов NaCl и CaCl<sub>2</sub>. Для проведения

исследований и оценки влияния добавки были взяты следующие грунты: тяжелый суглинок, песчаная супесь, песок средней крупности. При проведении опыта в укрепляемые грунты вносился цемент в следующих количествах:

- 10 % по массе;
- 15 % по массе;
- композиция 10 % цемента + + 1 % добавки на основе синтетических цеолитов.

Образцы тщательно перемешивались с внесением необходимого количества воды в целях

ЦЕОЛИТЫ – МИНЕРАЛЫ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ, ПОЛУЧАЕМЫЕ ТАКЖЕ ИСКУССТВЕННЫМ ПУТЕМ. ПОМИМО АДСОРБЦИОННЫХ УСТАНОВОК ПРИМЕНЯЮТСЯ ТАКЖЕ КАК НАПОЛНИТЕЛИ ДЛЯ АКВАРИУМОВ И КОШАЧЬИХ ТУАЛЕТОВ, В СОСТАВЕ СТИРАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ, В КАЧЕСТВЕ КОРМОВЫХ ДОБАВОК.



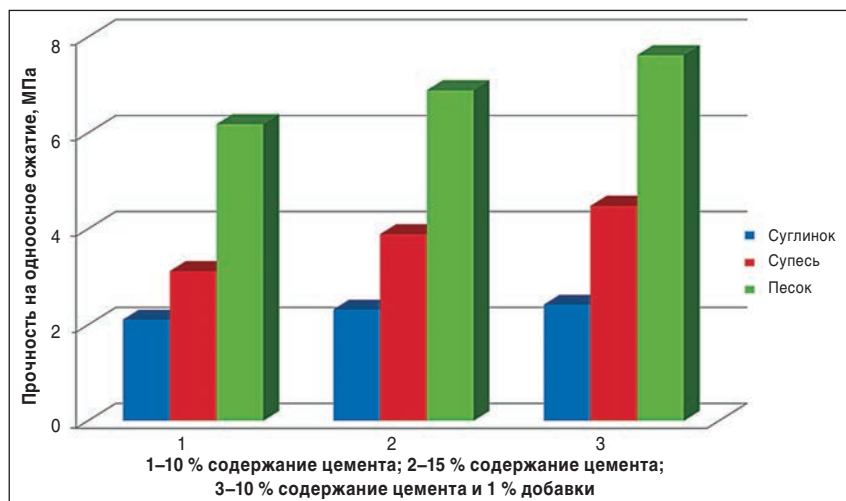


Рис. 4. Результаты испытаний по определению прочности на одноосное сжатие

доведения грунта до оптимальной влажности, после чего прессовались до максимальной плотности в кубических формах и выдерживались 28 сут. Результаты испытаний по определению прочности на одноосное сжатие для различных композиций представлены в таблице и на рис. 4.

Проведенные исследования показали эффективность добавки на основе синтетических цеолитов. Так, внесение добавки к цементу в количестве 1 % по массе вносимого вяжущего позволило:

- повысить прочность образцов укрепляемого суглинка до 14 % при том же расходе цемента, но без добавки;

- повысить прочность образцов укрепляемой супеси до 43 % при том же расходе цемента, но без добавки;

- повысить прочность образцов укрепляемого песка до 23 % при том же расходе цемента, но без добавки.

Помимо этого внесение добавки на основе синтетических цеолитов приводит к уменьшению деформации усадки на 42 % в укрепляемом суглинке, на 75 % в укрепляемой супеси и на 74 % в укрепляемом песке.

Такое поведение укрепляемых грунтов обусловлено тем, что при введении добавки на основе синтетических цеолитов начинает активно поглощаться и удерживать-

ся вода, содержащаяся в грунте, интенсифицируются ионообменные процессы, повышается количество внутреннего гидратного продукта при твердении и, как следствие, увеличивается прочность укрепляемых грунтов.

## ВЫВОДЫ

Анализ мирового опыта позволяет сделать вывод о том, что использование технологии Deep Soil Mixing способно решить проблему укрепления слабых грунтов при проектировании и строительстве морских нефтегазопромысловых сооружений и объектов береговой инфраструктуры на шельфе Дальнего Востока.

Преимущество данной технологии заключается в отсутствии необходимости разработки и утилизации слабых грунтов, поиска карьеров пригодных грунтовых строительных материалов, транспортировки грунта, его укладки и уплотнения. При этом DSM позволяет укреплять грунты оснований в массиве на месте производства работ при использовании только одного строительного материала – цемента.

Проведенные авторами исследования показывают, что применение добавки на основе синтетических цеолитов позволяет сократить расход цемента и повысить прочность укрепляемых грунтов. ■

## ЛИТЕРАТУРА

1. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах.
2. Coastal Development Institute Tokyo. The Deep Mixing Method: Principle, Design and Construction. – A.A.Balkema Publishers/Lisse/Abingdon/Exton (PA)/Tokyo, 2002. – 123 с.
3. Masaki Kitazume, Masaaki Terashi. The Deep Mixing Method. – CRC Press, 2013. – 410 с.
4. Bredenberg H., Broms B.B., Holm G. Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization. – A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield, 1999.
5. Пашкин Е.М., Савельев К.Н., Голубин С.И. Новые возможности укрепления грунтов на объектах магистрального трубопроводного транспорта нефти и газа. – Геотехника. – 2015. – № 2. – С. 24–31.
6. Сайпуллаев Ф.С., Хайитов Р.Р. Регенерация отработанного синтетического цеолита CaA и его характеристика // Молодой ученый. – 2015. – № 8. – С. 298–301.

## REFERENCES

1. Set of Rules 14.13330.2014. Construction in Seismic Areas.
2. Coastal Development Institute Tokyo. The Deep Mixing Method: Principle, Design and Construction. – A.A.Balkema Publishers/Lisse/Abingdon/Exton (PA)/Tokyo, 2002. – 123 p.
3. Masaki Kitazume, Masaaki Terashi. The Deep Mixing Method. – CRC Press, 2013. – 410 p.
4. Bredenberg H., Broms B.B., Holm G. Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization. – A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield, 1999.
5. Pashkin E.M., Savelyev K.N., Golubin S.I. New Opportunities to Strengthen Soils and at Oil and Gas Transport Main Pipeline Facilities. – Geotekhnika. – 2015. – No. 2. – P. 24–31.
6. Saypullaev F.S., Khayitov R.R. Regeneration of Spent Synthetic Zeolite CaA and its Characteristic // Young Scientist. – 2015. – No. 8. – P. 298–301.