

УНИКАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛАСТИЧНОЙ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩЕЙСЯ ЦЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СКВАЖИННЫХ УСЛОВИЯХ. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ

© Коллектив авторов,
2024



И.В. Денисов^{1,*}, А.С. Резвых¹, М.В. Микляев¹, Р.Н. Рязанов², В.Б. Губжоков³

¹Группа компаний «Газпром нефть», РФ, Санкт-Петербург

²ООО «Интеллект-Развитие-Технологии», РФ, Тюмень

³ООО «Нефтесервис», РФ, Тюмень

Электронный адрес: ProNeft@gazprom-neft.ru

Введение. В процессе строительства скважин производится цементирование обсадных колонн. Одной из целей цементирования является качественное разобщение вскрытых пластов, но в процессе строительства, освоения, эксплуатации скважины цементный камень может не сохраниться. Отсутствие герметичности цементного камня может приводить к заколонной циркуляции и возникновению межколонного давления (МКД).

Целью данной статьи является описание разработанной методики испытания отечественной самовосстанавливающейся цементной системы (СВЦ) на уникальном стенде TS-400, позволяющем имитировать скважинные условия, такие как давление и температура, а также оценить воздействие опрессовки обсадной колонны на целостность цементного камня и воздействие дифференциального давления на цементный камень. Также была оценена способность самозалечивания самовосстанавливающейся цементной системы при контакте с углеводородом в условиях, приближенных к скважинным.

Материалы и методы. Методика и порядок испытаний разработаны авторами данной статьи для обеспечения максимального приближения к скважинным условиям и процессам, обеспечивающим воздействие на цементный камень в приобсадной зоне скважины в соответствии с условиями на Бованенковском месторождении. Испытания проведены на уникальном стенде TS-400.

Результаты. В результате проведенных испытаний подтверждены свойства СВЦ к самозалечиванию трещин в цементном камне при скважинных условиях (давление, температура). Выработан порядок формирования программы нестандартных испытаний. Отмечен характер возникающих трещин в цементном камне в зависимости от центрации обсадной колонны. Описаны результаты цементирования скважин с СВЦ на одном из месторождений Группы компаний «Газпром нефть».

Заключение. Разработана методика испытания цементных камней в скважинных условиях. Проведены испытания СВЦ при скважинных условиях на стенде TS-400. Подтверждена способность СВЦ к самовосстановлению цементного камня при контакте с углеводородом. Подтверждена эффективность применения СВЦ при обеспечении герметичности межколонного пространства (МКП) в полевых условиях.

Ключевые слова: межколонные давления, МКД, межпластовые перетоки, целостность скважин, самовосстанавливающийся цемент, СВЦ, эластичный цемент, TS-400

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Денисов И.В., Резвых А.С., Микляев М.В., Рязанов Р.Н., Губжоков В.Б. Уникальные испытания отечественной эластичной самовосстанавливающейся цементной системы при скважинных условиях. Опыт применения. ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2024;9(4):117–123.
<https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-4-117-123>

Статья поступила в редакцию 03.07.2024

Принята к публикации 22.08.2024

Опубликована 27.12.2024

UNIQUE LABORATORY TESTS OF THE DOMESTIC ELASTIC SELF-HEALING CEMENT SYSTEM,
UNDER BOREHOLE CONDITIONS. APPLICATION EXPERIENCE

**Ivan V. Denisov^{1,*}, Alexander S. Rezvykh¹, Maxim V. Miklyaev¹, Roman N. Ryazanov²,
Vitaly B. Gubzhokov³**

¹Gazprom-neft GC, RF, Saint Petersburg

²Intellect-Development-Technologies LLC, RF, Tyumen

³Nefteservice LLC, RF, Tyumen

E-mail: ProNeft@gazprom-neft.ru

Background. During the construction of wells, casing strings are cemented. One of the goals of cementing is the qualitative separation of the layers, but in the process of construction, development, and operation of the well, the cement stone may collapse. Violation of the cement stone can lead to leaks in cement stones and the occurrence of sustained casing pressure (SCP).

The aim of this article is to describe the developed methodology for laboratory testing of a domestic self-healing cement system (SHC) on a unique TS-400 stand, which allows simulating downhole conditions such as pressure and temperature, as well as evaluating the impact of casing pressurizing on the integrity of cement stone and the effect of differential pressure on cement stone. The ability of self-healing of a SHC system in contact with hydrocarbons in conditions close to borehole conditions was also evaluated.

Materials and methods. The test procedure and methodology were developed by the authors of this article to ensure maximum approximation to downhole conditions and processes that ensure the impact on cement stone in the well in accordance with the conditions at the Bovanenkovskoye field. The tests were carried out on a unique TS-400 stand.

Results. As a result of the tests, the properties of the SHC to self-healing cracks in cement stone under borehole conditions (pressure, temperature) were confirmed. The procedure for the formation of a program of non-standard tests has been developed. The nature of cracks in the cement stone, depending on the standoff of the casing, is noted. The results of cementing wells with SHC at one of the fields of the Gazprom Neft GC are described.

Conclusions. A method for testing cement stones in borehole conditions has been developed. Tests of the SHC were carried out under borehole conditions at the TS-400 stand. The ability of the SHC to self-heal cement stone in contact with hydrocarbons has been confirmed. The effectiveness of the use of SHC in ensuring the well integrity in the field has been confirmed.

Keywords: Sustained casing pressure, SCP, Productive layers overflow, well integrity, self-healing cement, SHC, elastic cement, TS-400

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Denisov I.V., Rezvykh A.S., Miklyaev M.V., Ryazanov R.N., Gubzhokov V.B. Unique laboratory tests of the domestic elastic self-healing cement system, under borehole conditions. Application experience. PRONEFT. Professionally about oil. 2024;9(4):117–123. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-4-117-123>

Manuscript received 03.07.2024

Accepted 22.08.2024

Published 27.12.2024

ВОЗНИКНОВЕНИЕ МЕЖКОЛОННЫХ ДАВЛЕНИЙ

При строительстве скважин производится крепление обсадных колонн путем их цементирования. В процессе эксплуатации скважин затвердевший цементный камень испытывает циклические нагрузки вследствие изменения давления и температуры в скважине, что может привести к его нарушению целостности и возникновению заколонной циркуляции (ЗКЦ) и межколонному давлению (МКД). Причиной возникновения МКД может быть как некачественное замещение бурового раствора цементным при первич-

цементные системы (СВЦ), которые не только лучше противостоят циклическим нагрузкам за счет своих эластичных свойств, но и обладают функцией самозаживления трещин при контакте с углеводородами. Необходимо отметить, что в настоящее время отсутствует стандартная методология по испытанию СВЦ на возможность его самовосстановления в скважинных условиях. Ранее отсутствовало необходимое лабораторное оборудование, которое могло воспроизвести весь этап по затворению цементного раствора, его закачке в межколонное пространство, набору прочности цементного раствора в скважинных условиях (давление, температура), испытание устойчивости цементного камня при нагрузках, происходящих в скважине и дальнейшей оценке способности СВЦ к самовосстановлению при скважинных условиях. Ранее авторами данной статьи проводились испытания СВЦ на способность к самовосстановлению при атмосферном давлении и скважинной температуре, при этом давление при испытании равнялось атмосферному [1]. С целью расширения понимания процессов, происходящих с цементным камнем в заколонном пространстве при условиях приближенных к скважинным, разработана методика таких испытаний.

С ПОМОЩЬЮ МЕТОДИКИ, РАЗРАБОТАННОЙ АВТОРАМИ, НА УНИКАЛЬНОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ СТЕНДЕ TS-400 ПРОВЕДЕНЫ ИСПЫТАНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ КАМНЕЙ В СКВАЖИННЫХ УСЛОВИЯХ, ЧТО ПОДТВЕРДИЛО СПОСОБНОСТЬ СВЦ К ЛИКВИДАЦИИ НЕГЕРМЕТИЧНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПРИ КОНТАКТЕ С УВ.

ном цементировании, так и свойства самого цементного камня [1]. Для предотвращения возникновения МКД могут применяться эластичные самовосстанавливающиеся

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД TS-400

Для создания условий максимально приближенным к скважинным принято решение по использованию уникального стенда TS-400 разработки компании ООО «Интеллект-Развитие-Технологии» (ООО «ИРТ»). Стенд включает в себя (рис. 1): 1 — корпус с нагревательным/охлаждающим контуром; 2 — стальной толстостенный корпус (имитация наружной колонны); 3 — крышки с местами соединения с регистрирующими датчиками и нагнетательными/отводящими трубопроводами; 4 — образец обсадной трубы.

На рис. 2 представлено дополнительное оборудование необходимое для проведения тестирования: 1 — Стенд TS-400; 2 — насосная установка; 3 — регистрирующее оборудование.

Испытательный стенд способен обеспечивать твердение цементного камня в скважинных условиях (давление до 700 атм. и температура до 100 °С). Давление может подаваться как в образец обсадной колонны (имитация гидростатического давления либо опрессовки обсадной колонны), так и в межколонное пространство, непосредственно воздействуя на цементный раствор и цементный камень с регистрацией изменения давления над и под цементным камнем, а также замером величины перетока в случае его наличия. Таким образом, путем создания давления в обсадной колонне и затрубном пространстве можно обеспечить условия, соответствующие конкретной точке в скважине. Испытательный стенд также позволяет имитировать эксцентричное расположение обсадной колонны.

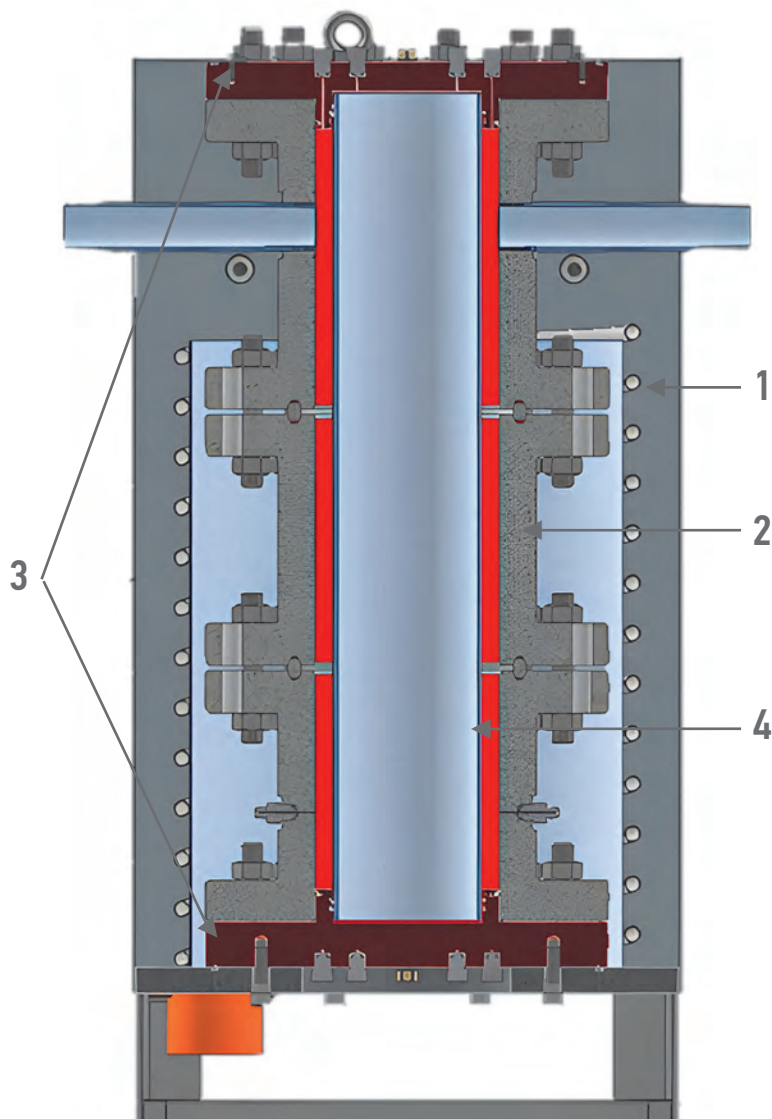


Рис. 1. Схема стенда TS-400. Составлено авторами
Fig. 1. Scheme of the TS-400 stand. Compiled by the authors

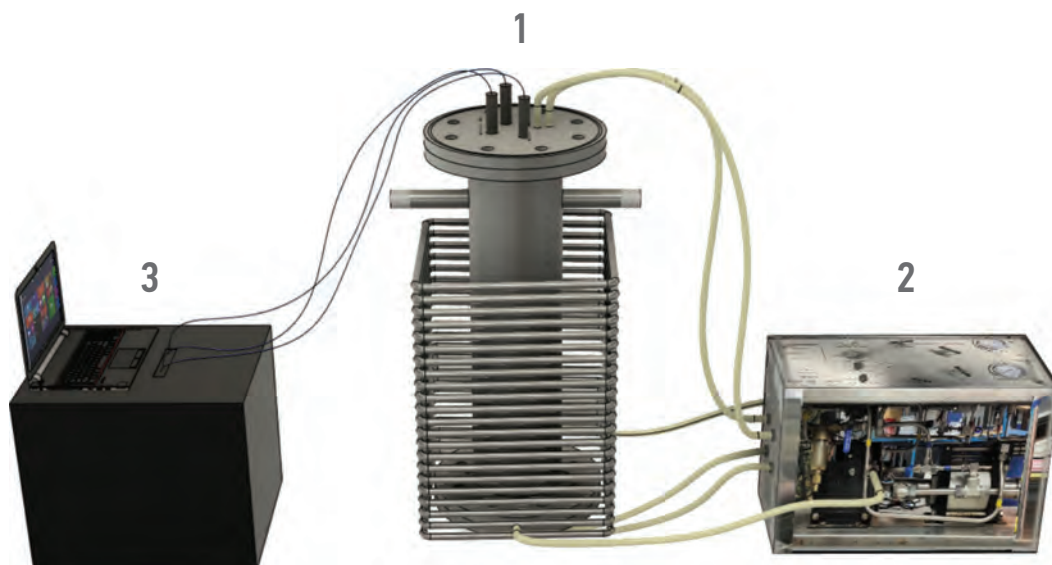


Рис. 2. Комплект оборудования при проведении испытаний. Составлено авторами.
Fig. 2. Equipment for laboratory testing. Compiled by the authors

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

В таблице 1 представлены исходные данные для проведения испытаний при скважинных условиях.

МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЯ СВЦ

Принято решение о полном снижении давления в межколонном пространстве над столбом цементного камня, т.к. согласно исследованиям [API 65-2] в процессе твердения цементного камня в скважине происходит снижение гидростатического давления на прилегающие пласты, что способствует интенсивному поступлению флюида из пластов в трещины в цементном камне из-за разницы между пластовым и гидростатическим давлениями. При формировании программы испытания учитывались все процессы, происходящие во время затвердевания цементного камня, дальнейших операций по опрессовке обсадной колонны, межколонного пространства (МКП), воздействие пластового давления на цементный камень. В процессе разработки программы испытаний принято решение о необходимости снижения давления в обсадной колонне до минимальных значений (0–10 атм) для имитации полного опорожнения обсадной колонны при добыче углеводородов. Основываясь на выше сказанном, разработана программа испытаний максимально приближенная к порядку и условиям проведения работ на скважине. Порядок выполнения испытаний:

- 1) разогрев испытательного стенда до 30 °С и поддержание температуры в период всего процесса испытания;

- 2) опрессовка испытательного стенда для исключения негерметичности обвязки и соединительных элементов в испытательном стенде;
- 3) приготовление цементного раствора, отбор проб;
- 4) закачка цементного раствора в межколонное пространство испытательного стенда;
- 5) создание избыточного давления в затрубном и трубном пространстве 94/74 атм соответственно;
- 6) ожидание затвердевания цемента (ОЗЦ) — 24 часа;
- 7) подача давления 60 атм снизу цементного камня (имитация пластового давления);
- 8) срабатывание давления до атмосферного выше цементного камня;
- 9) создание давления 274 атм в обсадной колонне (имитация опрессовки обсадной колонны на 200 атм, с учетом гидростатического давления);
- 10) выдержка обсадной колонны (ОК) под давлением 274 атм в течение 30 мин;
- 11) срабатывание давления в ОК до атмосферного. Наблюдение изменения давления в МКП над цементным камнем и под ним;
- 12) создание в ОК давления 10 атм для контроля изменения давления в ОК в случае возникновения негерметичности в обсадной колонне, либо в месте стыковки крышек TS-400 с обсадной колонной;
- 13) создание избыточного давления снизу цементного камня с целью выявления давления для создания системы трещин в цементном камне;
- 14) срабатывание давления в межколонном пространстве;
- 15) продувка систем трещин в цементном камне воздухом;

Таблица 1. Исходные данные для проведения лабораторных испытаний. Составлено авторами
Table 1. Initial data for conducting laboratory tests. Compiled by the authors

Показатель	Единица измерения	Значение
Гидростатическое давление в трубном пространстве в зоне интереса	атм	74
Гидростатическое давление в затрубном пространстве в зоне интереса	атм	94
Пластовое давление газового пласта	атм	60
Давление опрессовки обсадной колонны	атм	200
Температура в зоне расположения цемента	°С	30
Центрация обсадной колонны	%	50
Плотность цементного раствора	г/см ³	1,8
Диаметр обсадной колонны	мм	178
Плотность газоконденсата при нормальных условиях	г/см ³	0,735

- 16) расширение систем трещин путем прокачки через них воды;
- 17) прокачка через систему трещин газоконденсата;
- 18) создание давления в МКП 60 атм (имитация пластового давления);
- 19) технический отстой в течение 12 час на реакцию СВЦ с углеводородным конденсатом;
- 20) срабатывание давления в МКП;
- 21) опрессовка МКП снизу цементного камня воздухом (проверка газогерметичности цементного камня) на 60 атм;
- 22) определение давления необходимого для формирования вторичных трещин в цементном камне;
- 23) разбор установки TS-400. Визуальный осмотр цементного камня.

РЕЗУЛЬТАТ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

После выполнения пунктов программы испытаний с 1 по 11 выявлено, что по результату опрессовки обсадной колонны и срабатывания давления до атмосферного, герметичность цементного камня не нарушилась и перетока в МКП при 60 атм (пластовое давление) не наблюдалось. Далее выполнено нагнетание водой давления снизу в межколонное пространство с целью формирования трещин в цементном камне и фиксации давления, при котором будет зафиксирован переток через цементную матрицу. Нарушение герметичности цементного камня получилось добиться при давлении 97 атм (рис. 3). Заполнение трещин в цементном камне газоконденсатом произошло при давлении

240 атм. Закачка газоконденсата производилась снизу цементного камня. После заполнения системы трещин в цементном камне газоконденсатом межколонное пространство было изолировано, создано давление в МКП 60 атм (имитация пластового давления) сверху и снизу и оставлено на реакцию СВЦ с углеводородом (газоконденсатом). По истечении 12 часов, проведена проверка герметичности цементного камня путем создания давления 64 атм воздухом снизу, при этом наблюдалось падение на 2 атм за 15 минут, после чего падение давления прекратилось. Цементный камень оказался герметичен (рис. 4). Повторного нарушения цементной матрицы получилось достичь при избыточном давлении 82 атм, при этом начал наблюдаться рост давления вверх цементного камня (рис. 4).

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод, что герметичность цементного камня восстановилась по прошествии контакта СВЦ с газоконденсатом в течение 12 часов. По окончании испытаний произведен разбор испытательного стенда для визуальной оценки цементного камня. По результату разбора стенда TS-400 определено, что нарушение целостности цементной матрицы произошло по телу цементного камня в широкой его проекции (рис. 5).

ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

По результату проведенных лабораторных испытаний подтверждена способность СВЦ к самовосстановлению цементной матрице при контакте с углеводородом (газоконденсат). С целью оценки возможности

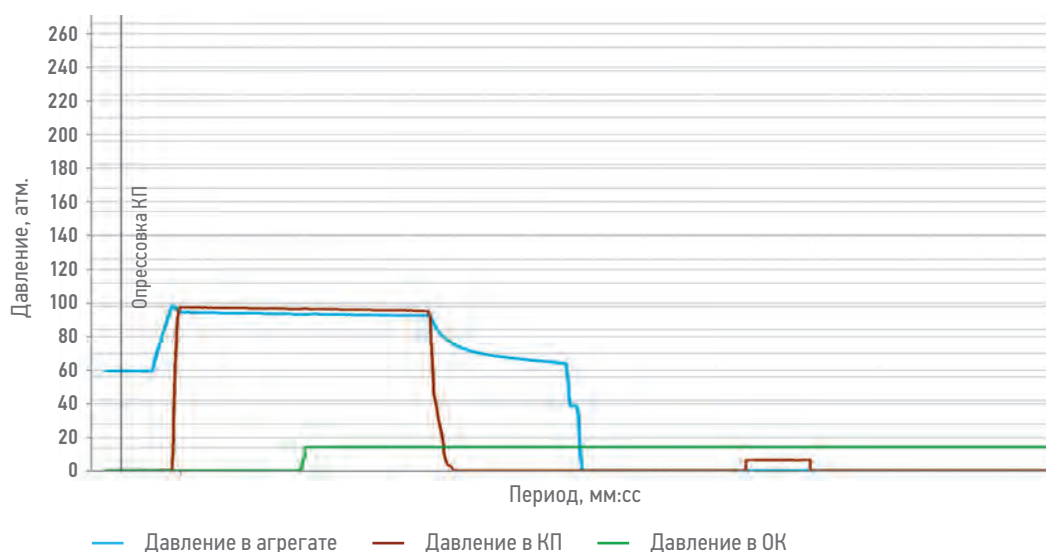
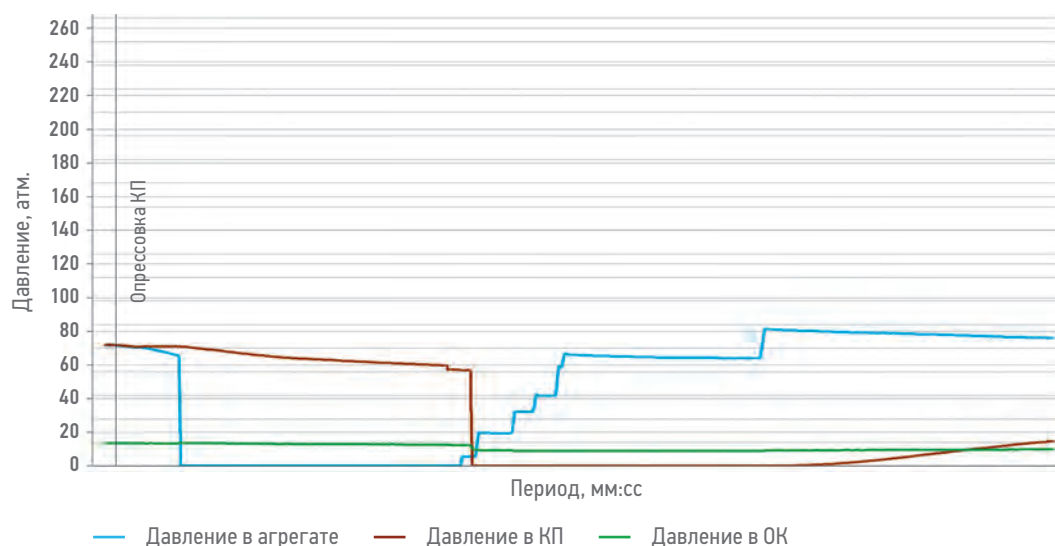


Рис. 3. График инициации трещин в цементной матрице. Составлено авторами
Fig. 3. Graph of cracks initiation in cement matrix. Compiled by the authors



подтверждена способность СВЦ к ликвидации негерметичности цементного камня при контакте с углеводородами (газоконденсат). Проведены опытно-промышленные испытания системы СВЦ на одном из месторождений Группы компаний «Газпром нефть», по результату которых

подтверждена возможность безаварийной закачки СВЦ на скважине и обеспечение герметичности межколонных пространств. Применение СВЦ потенциально позволяет повысить успешность герметичности МКП, а также устранить возникновение МКД на скважинах.

Список литературы

1. Денисов ИВ, Губжиков ВБ. Отечественная эластичная самовосстанавливающаяся цементная система как метод предупреждения и борьбы с межколонным давлением и межпластовыми перетоками. *ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти*. — 2023. — № 8(2). — С. 40–49. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2023-8-2-40-49>
2. Стандарт АНИ 65, часть 2. «Изоляция зон потенциального притока во время строительства скважин», декабрь 2010, с. 54–57 (на англ.).

References

1. Denisov IV, Gubzhikov VB. Domestic elastic self-healing cement system as a method of preventing and elimination of sustained casing pressure and productive layers overflows. *PROneft. Professionally about oil*. 2023, no. 8 (2), pp. 40–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2023-8-2-40-49>
2. API Standart 65-part 2. Isolating Potential Flow Zones During Well Construction. December 2012, pp. 54–57.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

И.В. Денисов — выполнил сбор данных, провел лабораторные испытания, принял участие в написании статьи.

А.С. Резвых — предоставил образцы для испытаний, принял участие в написании статьи.

М.В. Микляев — выполнил сбор данных, принял участие в написании статьи.

Р.Н. Рязанов — провел лабораторные испытания, принял участие в написании статьи.

В.Б. Губжиков — подбор цементной системы, принял участие в написании статьи.

Ivan V. Denisov — data collection, conducting laboratory tests, writing an article.

Alexander S. Rezvykh — provided samples for testing, writing the article.

Maxim V. Miklyaev — data collection, writing the article.

Roman N. Ryazanov — conducting laboratory tests, writing the article.

Vitaly B. Gubzhikov — preparing cement system, writing an article.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Иван Вячеславович Денисов* — руководитель направления по цементированию, Группа компаний «Газпром нефть»
190000, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Почтамтская, д. 3–5.
e-mail: ProNeft@gazprom-neft.ru

Александр Станиславович Резвых — руководитель по оперативному сопровождению бурения, Группа компаний «Газпром нефть»

Максим Викторович Микляев — руководитель по инженерной поддержке цементирования, Группа компаний «Газпром нефть»

Роман Николаевич Рязанов — директор, ООО «Интеллект-Развитие-Технологии»

Виталий Борисович Губжиков — заведующий лабораторией цементирования скважин, ООО «Нефтесервис»

Ivan V. Denisov* — Cementing function manager, Gazprom нефт company group
3–5, Pochtamtamtskaya str., 190000,
Saint Petersburg, Russia.
e-mail: ProNeft@gazprom-neft.ru

Alexander S. Rezvykh — Head of Operational Drilling Support, Gazprom нефт company group

Maxim V. Miklyaev — Head of Engineering Support for well cementing, Gazprom нефт company group

Roman N. Ryazanov — Director, “Intellect-Development-Technologies” LLC

Vitaly B. Gubzhikov — Head of the Well Cementing Laboratory, Nefteservice LLC

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author