УДК 622.257.12

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК НА УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ТАМПОНАЖНОГО МАТЕРИАЛА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ КРЕПЛЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

RESEARCH OF ADDITIVES INFLUENCE ON ELASTIC-STRENGTH PROPERTIES OF PLUGGING MATERIAL INTENDED FOR HORIZONTAL WELL CEMENTING

Силин Михаил Александрович
доктор химических наук,
заведующий кафедрой технологии химических веществ
для нефтяной и газовой промышленности,
РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина
silin.m@gubkin.ru

Магадова Любовь Абдулаевна
доктор технических наук,
профессор кафедры технологии химических веществ
для нефтяной и газовой промышленности
и кафедры (базовой) технологий повышения
нефтеизвлечения для объектов с осложненными условиями
(на базе ПАО «Газпром нефть»),
РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина
lubmag@gmail.com

Давлетшина Люция Фаритовна
доктор технических наук,
профессор кафедры технологии химических веществ
для нефтяной и газовой промышленности и кафедры
(базовой) технологий повышения нефтеизвлечения
для объектов с осложненными условиями
(на базе ПАО «Газпром нефть»),
РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина
luchiad@mail.ru

Стефанцев Александр Алексеевич
аспирант кафедры технологии химических веществ
для нефтяной и газовой промышленности,
РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина
stefantsev.aa@gmail.com

Кутузов Павел Андреевич
магистрант кафедры (базовой) технологий повышения
нефтеизвлечения для объектов с осложненными условиями
(на базе ПАО «Газпром нефть»),
РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина
pasha_kutuzov_00@mail.ru

Аннотация. Данная работа содержит исследование влияния минеральных и полимерных добавок на упруго-прочностные характеристики. Работа включает в себя два этапа: исследования при 38 ºС с целью предварительного отбора добавок; при 90 ºС с целью моделирования пластовых условий месторождения, для которого разрабатывается тампонажный состав. Оценка влияния добавок осуществлялась исходя из результатов определения прочности на сжатие и изгиб механическим способом тампонажного материала. Из протестированных добавок для улучшения упруго-прочностных характеристик цементного камня по результатам исследований при

Silin Mikhail Alexandrovich
Doctor of Chemical Sciences,
Head of the Department of Chemical
Technology for Oil and Gas Industry,
National University of Oil and Gas
Gubkin University
silin.m@gubkin.ru

Magadova Lubov Abdulayevna
Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Chemicals
Technology for Oil and Gas Industry
and of the Department (basic)
of oil recovery enhancement technologies
for facilities with complicated conditions
(on the basis of Gazprom Neft),
National University of Oil and Gas
Gubkin University
lubmag@gmail.com

Davletshina Lyutsia Faritovna
Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Chemicals
Technology for Oil and Gas Industry
and of the Department (basic)
of oil recovery enhancement technologies
for facilities with complicated conditions
(on the basis of Gazprom Neft),
National University of Oil and Gas
Gubkin University
luchiad@mail.ru

Stefantsev Aleksandr Alekseyevich
Post-graduate of the Department
of Chemicals Technology
for Oil and Gas Industry,
National University of Oil and Gas
Gubkin University
stefantsev.aa@gmail.com

Kutuzov Pavel Andreevich
Master's Student of the Department (basic)
of oil recovery enhancement technologies
for facilities with complicated conditions
(on the basis of Gazprom Neft),
National University of Oil and Gas
Gubkin University
pasha_kutuzov_00@mail.ru

Annotation. This work contains the research of influence of mineral and polymer additives on elastic and strength characteristics of plugging material for horizontal wells support. The work includes two stages: studies at 38 ºC for preliminary selection of additives; at 90 ºC for modeling of reservoir conditions of the field for which the plugging compound is developed. The influence of additives was analyzed based on the results of determining the compressive and flexural strength of the plugging material by mechanical means. From the tested additives for improving the elastic-strength characteristics of cement

38 ºС рекомендуется применение бутадиен-стирольного латекса или полипропиленовой фибры. Но при температуре 90 ºС данная добавка ухудшила упруго-прочностные характеристики. Наиболее перспективным для температуры 90 ºС по результатам экспериментов оказалось сочетание кварцевой муки, полипропиленовых волокон и компонента на основе эпоксидной смолы.

Ключевые слова: тампонажный материал, цементный камень, упруго-прочностные характеристики.

stone, according to the results of studies at 38 ºC, the use of butadiene-styrene latex or polypropylene fiber is recommended. But at the temperature of 90 ºC this additive worsened the elastic-strength characteristics. The most promising for the temperature of 90 ºC according to the results of experiments was a combination of quartz flour, polypropylene fibers and a component based on epoxy resin.

Keywords: plugging material, cement stone, elastic-strength characteristics.

Для разработки низкопроницаемых пластов, которые относятся к трудноизвлекаемым запасам (ТРиЗ), применяется горизонтальное бурение с последующим проведением многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП). При проведении МГРП цемент подвергается высоким переменным нагрузкам. В связи с этим предлагается использование полимерцементных композиций, близких по структуре к эластичным материалам и обладающих повышенными упруго-прочностными характеристиками [1].

Для тестирования были выбраны следующие добавки:

– Полипропиленовая фибра. Диаметр волокна 18 мкм, длина 12 мм;
– Резиновая крошка. Фракция размером 0–1 мм;
– Латекс Синтекс-65 (бутадиен-стирольный). Производство компании ООО «Синтекс»;
– Полиамидные гранулы (нейлон). Размер гранул 2–3 мм;
– Компонент на основе эпоксидной смолы (сополимер эпихлоргидрина и бисфенола А). При приготовлении тампонажного материала отдельно замешивался компонент на основе эпоксидной смолы (эпоксидная смола, разбавитель для смолы) и цементный состав с кварцевой мукой. После смоляной компонент добавлялся в цементный состав вместе с отвердителем для смолы, затем состав перемешивался в течение 3 минут для получения однородной системы;
– Кварцевая мука. Для увеличения термостойкости цементного камня. Добавлялась при исследовании тампонажных материалов при температуре 90 ºС. Водоцементное соотношение сохранялось равным 0,44.

На рисунке 1 представлены фотографии данных добавок.

Рисунок 1 – Исследуемые добавки:
1 – Полипропиленовая фибра; 2 – Резиновая крошка; 3 – Кварцевая мука;
4 – Латекс Синтекс-65 (бутадиен-стирольный); 5 – Полиамидные гранулы; 6 – Эпоксидная смола

В качестве цемента использовался портландцемент тампонажный бездобавочный типа I-G высокой сульфатостойкости (ПЦТ I-G-СС-1) с водоцементным соотношением (В/Ц) 0,44.

В работе проводились исследования по определению прочности на сжатие и прочности на изгиб механическим способом согласно ГОСТ 34532-2019. На первом этапе работы приготовленные тампонажные растворы заливались в формы и твердели 24 часа в водяной бане при 38 °С с целью предварительного отбора добавок. Концентрации добавок указаны в процентах по массе цемента (пмц).

Результаты исследований по определению прочности на сжатие и изгиб полимерцементных композиций при 38 °С представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Прочность исследуемых образцов в порядке убывания значения прочности на изгиб полимерцементных композиций при 38 °С

Образец	38 °С	
	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на изгиб, МПа
ПЦТ I-G-CC-1 с В/Ц 0,44 (исходный состав)	19,20	6,80
+ латекс Синтекс-65 3,0 $\%_{пмц}$	19,85 (+3,4 %)	7,90 (+16,2 %)
+ латекс Синтекс-65 1,5 $\%_{пмц}$	22,18 (+13,4 %)	7,05 (+3,4 %)
+ полипропиленовая фибра 0,1 $\%_{пмц}$	22,19 (+15,6 %)	6,68 (–1,8 %)
+ полипропиленовая фибра 0,2 $\%_{пмц}$	21,69 (+13,0 %)	6,41 (–5,7 %)
+ резиновая крошка 1,5 $\%_{пмц}$	22,35 (+16,4 %)	6,33 (–6,9 %)
+ резиновая крошка 3,0 $\%_{пмц}$	23,46 (+22,2 %)	4,46 (–34,4 %)
+ полиамидные гранулы 1,5 $\%_{пмц}$	18,94 (–1,4 %)	4,25 (–37,5 %)
+ полиамидные гранулы 3,0 $\%_{пвц}$	15,85 (–17,4 %)	3,88 (–42,9 %)

Согласно полученным данным применение полиамидных гранул не рекомендуется из-за снижения упруго-прочностных характеристик образцов. Добавление резиновой крошки привело к увеличению прочности на сжатие, но значительно снизило прочность на изгиб по сравнению с полипропиленовой фиброй, поэтому в качестве добавки для увеличения упруго-прочностных характеристик рекомендуется использование полипропиленовой фибры в концентрации 0,1 $\%_{пмц}$. Помимо этого, при её использовании наблюдается меньшее растрескивание камня при проведении исследования. Это объясняется тем, что фибра замедляет развитие уже образовавшихся дефектов и блокирует возникшие трещины [2]. Данное явление можно наблюдать на рисунке 2.

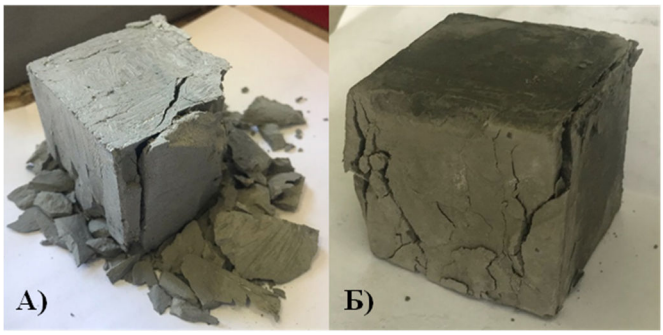

Рисунок 2 – Образцы ПЦТ I-G-CC-1 с В/Ц 0,44 после испытания прочности на сжатие: А) без добавления полипропиленовой фибры; Б) с добавлением полипропиленовой фибры 0,1 %пмц

При испытании полимерцементной композиции с добавлением Синтекс-65 (бутадиен-стирольный латекс) наблюдалось снижение подвижности цементного раствора при концентрации выше 3,0 $\%_{пмц}$, вследствие чего применение более высокой концентрации не рекомендуется без пластификатора.

По результатам исследований при 38 ºС можно отметить, что самыми перспективными добавками среди рассматриваемых для улучшения упруго-прочностных характеристик цементного камня являются полипропиленовая фибра и бутадиен-стирольный латекс. Однако сочетать данные добавки не рекомендуется, так как в этом случае наблюдается ухудшение реологических характеристик цементного раствора.

На втором этапе работы при температуре 90 °С осуществлялось моделирование пластовых условий месторождения, для которого разрабатывается данный состав.

Результаты исследований по определению прочности на сжатие и изгиб полимерцементных композиций при 90 °С представлены в таблице 2. В таблице 2 указаны проценты изменения прочности образцов по отношению к составу ПЦТ с кварцевой мукой.

На рисунке 3 представлены фотографии ПЦТ I-G-CC-1 с В/Ц 0,44, которые твердели при 38 °С и 90 °С.

Из рисунка 3 видно, что при температуре твердения 90 °С происходит образование трещин и расслаивание цементного камня. Это может привести к снижению качества крепления скважины, и как следствие, к появлению заколонных перетоков. Образование трещин объясняется самопроизвольным преобразованием высокоосновных гидросиликатов в низкоосновные в процессе твердения при повышенных температурах. Исходя из таблицы 2, можно отметить, что при повышенной температуре возрастает прочность на сжатие вследствие увеличения скорости реакций гидратации вяжущего

материала, но снижается прочность на изгиб. Следовательно, для цементного камня, твердеющего при высоких температурах, рекомендуется использование кварцевой муки, которая, вступая в реакцию с продуктами гидратации вяжущего, сразу образует низкоосновные гидросиликаты кальция [3, 4].

Таблица 2 – Прочность исследуемых образцов в порядке убывания значения прочности на изгиб полимерцементных композиций при 90 °С

Образец	90 °С	
	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на изгиб, МПа
ПЦТ I-G-CC-1 с В/Ц 0,44 (исходный состав)	44,93	6,19
ПЦТ/кварцевая мука = 90/10	39,74	7,94
+ полипропиленовая фибра 0,1 $\%_{пмц}$	41,11 (+3,5 %)	7,86 (–1,0 %)
+ полипропиленовая фибра 0,2 $\%_{пмц}$	41,32 (+4,0 %)	7,64 (–3,8 %)
+ смоляной компонент 5,0 %пмц + полипропиленовая фибра 0,1 $\%_{пмц}$	35,63 (–10,3%)	7,62 (–4,0 %)
+ смоляной компонент 5,0 $\%_{пмц}$	35,00 (–11,9 %)	7,35 (–7,4 %)
+ смоляной компонент 10,0 $\%_{пмц}$	24,26 (–39,0 %)	5,61 (–29,3 %)
+ латекс Синтекс-65 1,5 $\%_{пмц}$	19,63 (–50,6 %)	4,62 (–41,8 %)
+ латекс Синтекс-65 3,0 $\%_{пмц}$	16,56 (–58,3 %)	3,80 (–52,1 %)

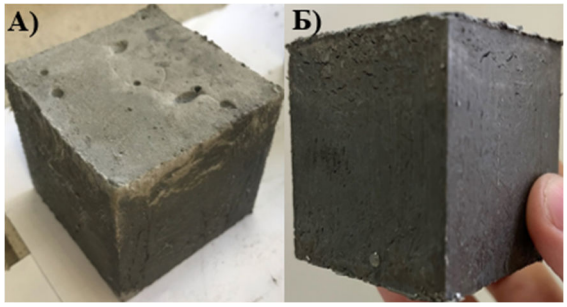

Рисунок 3 – Образцы ПЦТ I-G-CC-1 с В/Ц 0,44:
А) твердел 24 часа при 38 °С; Б) твердел 24 часа при 90 °С

Далее при температуре твердения 90 °С исследовались полимерные добавки для увеличения упруго-прочностных характеристик. На рисунке 4 представлены образцы полимерцементного камня при добавлении латекса и при добавлении смоляного компонента.

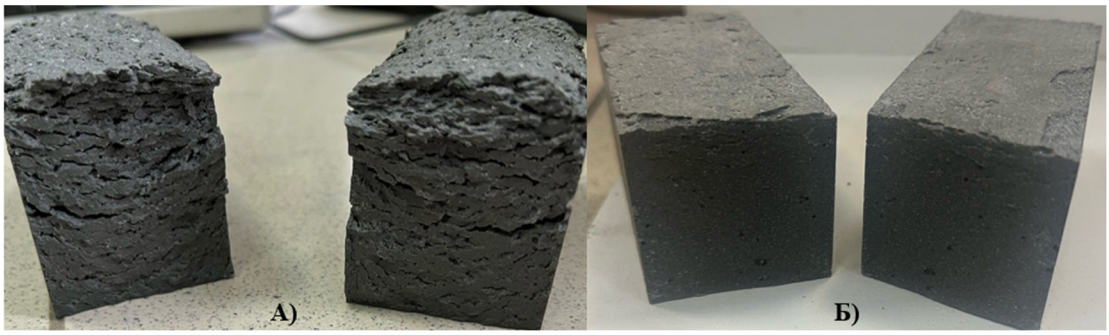

Рисунок 4 – Образцы полимерцементного материала после испытания прочности на изгиб, твердевшие при 90 °С:
А) с добавлением латекса Синтекс-65 3,0 %пмц; Б) с добавлением смоляного компонента 5,0 %пмц

В процессе твердения латекс-цементного состава при 90 °С усиливается образование трещин и расслоение цементного камня, снижаются его прочностные характеристики по результатам, представленным в таблице 2. Следовательно, при температуре 90 °С и выше использование латекса в качестве добавки для повышения упруго-прочностных характеристик не рекомендуется.

Как видно из рисунка 4, в процессе твердения смоло-цементного состава при 90 °С расслоение не наблюдалось, образовался цементный камень с однородной структурой. Исходя из таблицы 2, компонент на основе эпоксидной смолы в концентрации 5,0 $\%_{пмц}$ при добавлении в цементный состав снижает прочность на изгиб цементного камня на 7,4 % по отношению к составу ПЦТ с кварцевой мукой за 1 сутки твердения. Вероятнее всего, это происходит вследствие замедления образования про-

дуктов гидратации цемента. Однако происходит увеличение упругости цементного камня, что подтверждается результатами в работе [5]. Сочетание смоляного компонента и полипропиленовой фибры улучшает полученный результат по сравнению с добавлением только смоляного компонента.

В данной работе были проведены исследования полимерцементных композиций при температурах твердения 38 и 90 °С. При температуре 38 °С рекомендовано применение бутадиен-стирольного латекса (3,0 $\%_{пмц}$) или полипропиленовой фибры (0,1 $\%_{пмц}$). Бутадиен-стирольный латекс повышает прочность на сжатие (на 3,4 %) и прочность на изгиб (на 16,2 %). Полипропиленовая фибра является армирующей добавкой и замедляет процесс образования трещин.

Но стоит отметить, что при температуре 90 °С бутадиен-стирольный латекс значительно ухудшает прочностные характеристики. В зависимости от концентрации (1,5 и 3,0 $\%_{пмц}$) прочность на сжатие снижается на 50,6 и 58,3 % соответственно; прочность на изгиб – на 41,8 и 52,1 % соответственно. По результатам исследований, для данной температуры рекомендовано использование полимерцементной композиции, состоящий из кварцевой муки (в качестве добавки для увеличения термической стойкости цементного камня), полипропиленовой фибры (в качестве армирующей добавки), компонента на основе эпоксидной смолы (в качестве добавки для повышения упруго-прочностных характеристик).

В дальнейшем планируется исследование прочности на сжатие и прочности на изгиб смоло-цементного состава, твердеющего более 1 суток, а также создание динамических нагрузок на цементный камень с помощью гидравлического пресса для моделирования процесса МГРП. Затем будет осуществлен подбор необходимых добавок для регулирования характеристик смоло-цементного состава с целью соответствия требованиям, предъявляемым к тампонажным материалам при креплении горизонтальных скважин.

Список литературы:

1. Successful zonal isolation of horizontal liner with cement designed for mechanical loads during multiple hydraulic fracturing treatments in Western Siberia / Sergey Sergeev and [et al.]. // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – 2017.
2. Агзамов Ф.А. Влияние фиброармирования на свойства тампонажных материалов / Ф.А. Агзамов, М.А. Тихонов, Н.Х. Каримов // Территория нефтегаз. – 2013. – №. 4. – С. 26–31.
3. Толыпина Н.М. Особенности фазообразования в цементных системах при повышенных температурах и влажности / Н.М. Толыпина, Д.Ю. Чашин, Е.Н. Хахалева // Наука и инновации в строительстве. – 2023. – С. 237–241.
4. Effect of the crystalline state of SiO_2 on the compressive strength of cement paste at HTHP / C. Geng [et al.] // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 362. – P. 15.
5. Study on an epoxy resin system used to improve the elasticity of oil-well cement-based composites / J. Song [et al.] // Materials. – 2022. – Vol. 15. – Iss. 15. – P. 12.

List of references:

1. Successful zonal isolation of horizontal liner with cement designed for mechanical loads during multiple hydraulic fracturing treatments in Western Siberia / Sergey Sergeev and [et al.]. // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – 2017.
2. Agzamov F.A. Effect of fiber armoring on the properties of plugging materials / F.A. Agzamov, M.A. Tikhonov, N.H. Karimov // Oil and gas territory. – 2013. – Vol. 4. – P. 26–31.
3. Tolypina N.M. Specific features of phase formation in cement systems at elevated temperatures and humidity / N.M.Tolypina, D.Yu. Chashin, E.N. Khakhaleva // Science and innovation in construction. – 2023. – P. 237–241.
4. Effect of the crystalline state of SiO_2 on the compressive strength of cement paste at HTHP / C. Geng [et al.] // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 362. – P. 15.
5. Study on an epoxy resin system used to improve the elasticity of oil-well cement-based composites / J. Song [et al.] // Materials. – 2022. – Vol. 15. – Iss. 15. – P. 12.