Композиционные материалы на основе дисперсного гидросиликата натрия в технологиях увеличения нефтеотдачи

Composite materials based on dispersed sodium hydrosilicate in enhanced oil recovery technologies

A.B. АНТУСЕВА^{1,3}, Д.А. ГОСПОДАРЕВ¹, Е.Ф. КУДИНА^{2,3}

A.V. ANTUSEVA^{1,3}, D.A. GOSPODAREV¹, E.F. KUDINA^{2,3}

¹ РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» БелНИПИнефть, Беларусь

² Белорусский государственный университет транспорта, Беларусь

³ ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной Академии Наук Беларуси»

¹ Belarusian Oil Research and Design Institute BelNIPIneft

² Belarusian State University of Transport

³ The State Scientific Institution V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus

a.antuseva@beloil.by

Разработана гелеобразующая композиция на основе дисперсного гидросиликата натрия, кислотного модификатора и полимерной добавки, концентрационные соотношения компонентов в которой позволяют варьировать в широких пределах свойства композиций и формируемых на их основе гелей, обеспечивая возможность их успешного использования на объектах с различными геолого-физическими условиями (тип обрабатываемого коллектора, степень проницаемости пород, температура и т.д.).

Ключевые слова: дисперсный гидросиликат натрия, кислотный модификатор, гель, гелеобразование, водоизоляция, увеличение нефтеотдачи

A gel-forming composition based on dispersed sodium hydrosilicate, an acid modifier and a polymer additive has been developed. The concentration ratios of components in it allow varying within a wide range the properties of the compositions and the formed gels, ensuring the possibility of their successful use at facilities with different geological and physical conditions (type of treated collector, degree rock permeability, temperature, etc.).

Keywords: dispersed silicate hydrate sodium, acid modifier, gel, gel-forming, water-shut-off, increased oil recovery

DOI: 10.35164/0554-2901-2021-1-2-51-54

Введение

С целью повышения эффективности эксплуатации нефтяных скважин, регулирования потоков пластовых вод и нефти используют водоизоляционные материалы, способные создавать в обводненных пропластках непроницаемые экраны [1]. Практическое применение нашли синтетические смолы, гели полиакриламида с органическими и неорганическими сшивателями, гидролизованый полиакрилонитрил – гипан и др. [2, 3].

На нефтяных месторождениях Республики Беларусь наибольшее распространение при формировании гидроизоляционных экранов получили водоизолирующие композиции на основе состава ОВП-2 и коагулянта – минерализованной пластовой воды; глинистые суспензии, модифицированные полиакрилонитрилом; кремнийорганические составы АКОР-БН102 и состав Пласт-СТ. Однако указанные композиции не всегда способны генерировать прочные долговечные водонепроницаемые гидроэкраны в трещинных коллекторах, особенно в условиях высоких пластовых температур [4].

Целью данной работы являлось исследование физико-химических свойств гелеобразующих растворов на основе дисперсного гидросиликата натрия, кислотного модификатора и полимерной добавки, изучение технико-эксплуатационных свойств кремнегелей и адаптации разработанного состава к геолого-техническим параметрам обрабатываемых залежей.

Экспериментальная часть

Для получения композиции использовали следующие реагенты: – дисперсный гидросиликат натрия (ДГСН, ТУ ВУ 200101299.003-2009), производитель – ОАО «Домановский производственно-торговый комбинат» (РБ, Брестская обл., Ивацевичский район, д. Доманово) – гелеобразующая основа;

– сульфаминовая кислота – кристаллический продукт белого цвета с массовой долей основного вещества 95,0–99,5% (САК, ТУ 2121-083-05800142-2011, производитель – ОАО «Пигмент», РФ) – кислотный модификатор (КМ).

В качестве модификатора композиций, формируемых на основе водного раствора гидросиликата натрия, изучали термостойкий сульфонируемый полиакриламид (ПАА) марки AN 125 (производитель – SNF Floerger, Франция).

Растворителем служила пресная вода, которая применяется на объектах РУП ПО «Белоруснефть» (плотностью 1,000–1,005 г/см³) для приготовления технологических жидкостей. При приготовлении проб композиций использовали реагенты, а также воду затворения, де-факто применяемые в промышленных условиях.

Изучение процесса гелеобразования композиционных растворов проводили в температурном диапазоне 50–90°C. Пробы композиций на основе ДГСН и САК, модифицированных ПАА, получали следующим образом. Сначала готовили концентрированный водный раствор ДГСН, разбавлением которого получали раствор гелеобразователя определенной концентрации. Затем при постоянном перемешивании раствора вводили ПАА. После получения однородного композиционного раствора добавляли САК.

Реагенты совмещали при температуре (20±2)°C в определенных соотношениях: концентрация ДГСН варьировалась от 5,0 до 20,0%; концентрация САК – от 1,3 до 6,0%; концентрация ПАА – от 0,1 до 0,3%.

Время гелеобразования раствора композиции определяли как время, по истечении которого раствор теряет текучесть.

Изменение прочности образцов гидрогелей после их выдержки в исследуемых температурных режимах (50–90°C) исследовали методом пенетрации. Для этого герметично закрытые образцы

сначала выдерживали при температурах испытаний. Затем, через 24 часа, их извлекали из термостата, охлаждали и измеряли напряжение пенетрации (σ_p) при помощи текстурометра TA.XT.plus (Stable Micro Systems, Англия). В качестве индентора использовали прямой круглый цилиндр диаметром 0,5 дюйма из полиоксидилен-а, который погружали в образец геля на глубину 4 мм со скоростью 1 мм/с и измеряли значение σ_p .

Обсуждение результатов

По результатам лабораторных исследований, проводимых при разработке базовой рецептуры состава, установлено, что показатель концентрации ионов водорода (pH) составов композиции находится в интервале 10–11, все составы характеризуются низкими значениями динамической вязкости (1–3 мПа·с при 20°C). Это свидетельствует о низкой коррозионной активности составов композиций по отношению к технологическому и скважинному оборудованию и об отсутствии существенных гидродинамических сопротивлений при закачивании композиций в пласт. Исследования показали, что время гелеобразования раствора композиции и прочностные характеристики гелей зависят от соотношения исходных реагентов и могут адресно варьироваться для конкретного применения с учетом температур пласта [5].

Для определения оптимальных концентраций реагентов и установления зависимостей прочностных характеристик и времени образования геля водоизоляционного состава, а также учитывая, что для закачивания всего объема композиции с устья скважины в зону изоляции необходимо не менее 2,5–3 ч, получали растворы с различным соотношением дисперсного гидросиликата натрия и сульфаминовой кислоты. Результаты экспериментов по определению оптимальных концентрационных соотношений компонентов представлены в таблице 1 и на рис. 1–4.

Таблица 1. Влияние концентрации реагентов на время гелеобразования и пенетрометрическую прочность водоизоляционного состава.

Концентрация реагентов, %		Время гелеобразования, мин.	σ_p , Па
ДГСН	САК		
1	0,5	—	—
3	0,5	—	—
5	1,0	180	715
	1,3	200	1140
	1,5	185	3590
	1,8	100	3950
	2,0	60	6850
6	2,5	25	7900
	1,5	190	3500
	1,8	165	3930
	2,0	100	3970
8	2,5	30	6620
	1,5	200	950
	1,8	190	1540
	2,0	120	2920
10	2,3	110	2990
	2,5	75	3580
	1,8	190	970
	2,0	140	2105
15	2,3	130	2340
	2,5	105	3220
	3,0	25	9130
	3,2	60	14100
20	3,4	30	36000
	5,5	—	—
	5,8	30	33650
20	6,0	5	45800

Примечание: «—» гель в течение 24 ч не образовался

Экспериментальные исследования показали, что варьируя соотношение компонентов, можно получать гели с временем гелеобразования от 5 до 200 минут и прочностью от 1105 до 45800 Па.

Рис. 1. Зависимость пенетрометрической прочности геля состава ДГСН/САК от концентрации ДГСН (концентрация САК 2,5%).

Рис. 2. Влияние концентрации САК на время гелеобразования раствора композиции (а) и прочность геля (б).

Анализ полученных результатов исследований, представленных в таблице 1 и на рис. 1–2, позволил установить следующие закономерности:

- с увеличением концентрации ДГСН время гелеобразования композиции увеличивается, но при этом прочность геля снижается;
- с уменьшением концентрации САК время гелеобразования увеличивается;
- варьирование концентрационных соотношений компонентов ДГСН и САК позволяет обеспечить приемлемые технологические параметры композиций (время гелеобразования, механическая прочность геля).

Установлено, что на технологические свойства состава влияет не только концентрационное соотношение компонентов в растворе композиции, но и температура формирования геля. Для изучения влияния температуры исследовали свойства четырех составов при различных температурах (50, 60, 70, 80, 90°C), которые соответствовали среднетемпературным температурам белорусских нефтяных месторождений. Для экспериментальных составов выбраны следующие концентрации реагентов: ДГСН – 5–10%, САК – 1,5–2%. Выбор данных составов обусловлен тем, что формируемые гели характеризуются оптимальным сочетанием показателей прочности и времени гелеобразования. Полученные зависимости времени образования и прочности гелей от температуры представлены на рис. 3, 4.

Рис. 3. Влияние температуры на время гелеобразования составов.

Рис. 4. Влияние температуры на прочность гелей.

Анализ полученных зависимостей времени гелеобразования составов от температуры позволяет установить следующие закономерности. С увеличением концентрации ДГСН и САК время гелеобразования сокращается. Следует отметить, что для температурных условий 75–80°C (например, Южно-Сосновское нефтяное месторождение, РБ) время гелеобразования раствора композиции изменяется от 100 до 190 минут.

Значения прочности разработанного состава (3400–4000 Па) являются приемлемыми для всех исследуемых температур (50–90°C). Прочность гелей достигает максимального значения при 70–90°C (3550–4000 Па). При этом наблюдается следующая закономерность: при снижении времени гелеобразования раствора композиции увеличивается прочность образуемого геля.

Кроме влияния температурного фактора на прочностные характеристики геля изучено воздействие временного фактора, так как гелеобразование происходит не сразу, а по истечении времени. На основании анализа научно-технической литературы предположено, что прочность геля с течением времени может увеличиваться [6]. Для изучения данного предположения проведено исследование по определению влияния времени экспозиции геля (4–100 ч) на его прочность. Анализ проводили на модельной композиции (6% ДГСН и 2,3% САК). Прочность каждого образца измерялась в течение 4–100 часов после гелеобразования. Измерения проводились при температуре 60°C. Влияние времени экспозиции геля на его прочность показано на рис. 5.

Рис. 5. Динамика упрочнения геля в течение 4–100 ч при 60°C.

Изменение пенетрометрической прочности за 100 часов происходит по экспоненциальной кривой. Динамика изменения прочности геля, представленная на рис. 5, показывает, что максимальное упрочнение состава продолжается в течение первых 24 ч после образования геля. Несмотря на увеличение данного параметра в первые сутки, дальнейшее изменение прочности незначительное, поэтому рекомендуется время технологической паузы после закаливания состава принимать равным 15–24 ч.

На реальных объектах, отличающихся высокими фильтрационными характеристиками, применяют составы, обладающие повышенной вязкостью, что способствует снижению потери жидкости и равномерному фронту ее размещения. Для повышения эффективности водоизоляционных работ исследовали влияние полимерной добавки на физико-химические свойства композиции состава ДГСН/САК (таблица 2).

Сравнение экспериментальных данных, представленных в таблице 2, показывает, что вязкость исследуемых растворов находится в прямой зависимости от концентрации полимера и увеличивается от 1,91 до 8,07 мПа·с (в 1,7–7,0 раз) при возрастании концентрации ПАА от 0,05% до 0,3%.

Таблица 2. Физико-химические свойства состава, модифицированного полимерной добавкой.

Компонентный состав, %			Физико-химические показатели			
ДГСН	САК	AN125	Плотность, г/см ³	Динамическая вязкость, мПа·с	Время гелеобразования, мин	$\sigma_{\text{п}}$, Па
6	1,8	0	1,045	1,14	165	3770
		0,05		1,91		3830
		0,1		3,02		3910
		0,2		6,05		3070
		0,3		8,07		1280

В то же время прочностные характеристики гелей при введении ПАА изменялись незначительно. Наиболее высокая прочность геля достигается при модифицировании состава полимерной добавкой в количестве 0,1%. Модифицирование гелеобразующей композиции позволило увеличить прочность сформированного геля до 3910 Па, что на 5% выше прочности исходного геля (3770 Па при проникновении индентора на глубину 4 мм). Дальнейшее повышение концентрации ПАА приводит к снижению прочности силикагеля.

Зависимости, представленные на рис. 6, показывают тенденцию к повышению индукционного периода гелеобразования при увеличении массового соотношения концентраций гелеобразующей основы и кислотного модификатора в композиции.

Рис. 6. Зависимость времени гелеобразования от соотношения компонентов состава.

Для определения эффективности водоизолирующего действия состава композиции и оценки способности создавать в поровом пространстве пласта гидроэкранирующий материал, препятствующий фильтрации воды, выполнена серия экспериментов по исследованию фильтрационной способности материала на четырех насыпных моделях карбонатного пласта.

Оценка гидроизолирующих свойств материала заключалась в следующем. Через модель пласта обратной закачкой прокачивали оторочку состава в количестве трех поровых объемов модели. Далее модель выдерживали при температуре 80°C в течение 24 часов для завершения процесса гелеобразования и осуществляли прямую прокачку пластовой воды для определения степени снижения проницаемости.

Результаты испытаний разработанного материала с оптимизированным составом в динамических условиях показали, что гидроэкранный, сформированный при прокачке композиций через модель пласта, оказывает высокое остаточное сопротивление фильтрации воды (значение ОФС 73–157) и выдерживает значительный градиент давления (до 114,88 МПа/м) при обеспечении высокого гидроизолирующего эффекта (98,6–99,4%).

Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что предлагаемый для ограничения водопритока гелеобразующий состав обладает рядом существенных эксплуатационных свойств:

- применимость в широком интервале пластовых температур (50–90°C);
- низкая коррозионная активность;
- технологичность приготовления в прискважинных условиях;
- образование однородного геля во всем объеме;
- низкая вязкость состава до начала гелеобразования (1–4 мПа·с).

В качестве положительных качеств гелеобразующего состава следует также отметить низкую стоимость, доступность исходных компонентов, используемых для получения геля, и низкую токсичность предлагаемого состава. Применение в качестве гелеобразующей основы композиции дисперсного гидросиликата натрия позволяет улучшить транспортировку реагента (по сравнению с водным раствором силиката натрия) и расширить температурный диапазон применения композиции.

Заключение

Таким образом, проведены работы по исследованию составов гелеобразующих композиций, получаемых на основе экологически чистого производимого крупнотоннажно продукта – дисперсного

гидросиликата натрия. На основании результатов выполненных исследований по основным технологическим параметрам (время гелеобразования, вязкость рабочего раствора, прочность гелей) наиболее приемлемым для выполнения водоизоляционных работ в условиях нефтяных залежей при пластовой температуре – 75–80°C (например, Южно-Сосновское нефтяное месторождение скв. №№ 101 и 100s3, тип коллектора – карбонатный, РБ) является водоизолирующий состав на основе дисперсного гидросиликата натрия, содержащего добавку полимерного модификатора, что позволяет обеспечить индукционный период гелеобразования – 2,5–3 ч и прочность формируемых гелей – 3500–4000 Па.

Литература

1. Стрижнев К.В. Ремонтно-изоляционные работы в скважинах. – СПб: Недра, 2010, 560 с.
2. Бадретдинов И.А., Карпов В.Г. Классификация методов увеличения нефтеотдачи. // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2014, Т.9, №1.
3. Боксерман А.А. Востребованность современных МУН – обязательное условие преодоления падения нефтеотдачи. // Нефтяное хозяйство, 2004, №10.
4. Антусева А.В., Кудина Е.Ф., Печерский Г.Г. Гелеобразующие материалы для повышения нефтеотдачи пластов в условиях высокотемпературных коллекторов // Нефтяник полесья, 2018, №2 (34), с.68–75.
5. Антусева, А.В., Кудина Е.Ф., Самусева Л.В. Композиционные материалы водоизоляционного назначения в технологиях нефтедобычи (обзор) // Полимерные материалы и технологии (обзор), 2018, Т.4, № 4, с. 6–28.
6. Кудина Е.Ф., Печерский Г.Г., Шаповалов В.М. Гелеобразующие технологии и материалы водоизоляционного назначения на основе водорастворимых силикатов (обзор) // Материалы, технологии, инструменты (обзор), 2010, Т.15, № 4, с. 62–74.