
ОТКРЫТАЯ НАУКА

Научная статья

УДК 622.276.7

DOI: 10.15372/KhUR2025636

EDN: RCPHOC

Разработка тампонажных составов на основе гидрогелей полиакриламида с дисперсными и волокнистыми наполнителями

Р. Н. ЯКУБОВ¹ , А. С. ПАВЛИК¹, Л. Е. ЛЕНЧЕНКОВА¹, В. А. СТРИЖНЕВ², А. А. ПОЛИТОВ³, Е. И. ГУСАРОВА⁴,
А. А. МАМЫКИН², Г. А. ТЕПТЕРЕВА¹, А. Г. ТЕЛИН²

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

²Уфимский научно-технический центр, Уфа, Россия

³Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

⁴Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

E-mail: rav_rb@bk.ru[✉], Inplay@mail.ru, lenchenkoval@mail.ru, strijnewva@ufntc.ru, anpolitov@yahoo.com,
gusarovaei@ufntc.ru, mamikinaa@ufntc.ru, teptereva.tga@yandex.ru, telinag@ufntc.ru

Аннотация

Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений зачастую сопровождается непредвиденными осложнениями, для ликвидации которых требуется проведение качественных ремонтно-изоляционных работ (РИР). В работе рассмотрены пути повышения эффективности проведения РИР в нефтяных и газовых скважинах с применением гелеобразующих тампонажных материалов. Предлагается использование различных гидрофильных и гидрофобных дисперсных и волокнистых наполнителей на основе полиакриламида и комплексного органического сшивателя в гидрогелях с целью улучшения их реологических свойств и увеличения блокирующей способности. Полученные таким образом органо-неорганические композиты демонстрируют разнообразие реологических свойств, что позволяет выбирать необходимые гелевые композиции для решения тех или иных задач РИР. Представлены результаты реологических (осцилляционных) и фильтрационных исследований, а также опытно-промышленных испытаний составов. В качестве дисперсных наполнителей при проведении осцилляционных исследований были использованы хризотил, черная сажа, гидрофильный нанокремнезем и механоактивированные древесная мука, шелуха риса, гидролизный лигнин. Среди волокнистых наполнителей рассмотрены полипропиленовая фибра, базальтовые и углеродные волокна. По результатам осцилляционных исследований определены величины модулей упругости (G') и вязкости (G''), точки кроссовера и линейного диапазона измерения для каждого из составов. Достигнуто увеличение модуля упругости до 48 % ($G' = 53.3$ Па) при добавлении черной сажи и до 50 % ($G' = 54.2$ Па) для состава с хризотилом и углеродным волокном по сравнению с базовым гидрогелем без наполнителей ($G' = 36.1$ Па). Добавление гидрофильного нанокремнезема позволило увеличить предел текучести (точка кроссовера) более чем на 300 % (до 210.4 Па). Фильтрационные исследования выполнены на модели идеальной трещины различной раскрытости (50, 100, 650 мкм) с использованием естественных образцов зерна. Установлено, что при фильтрации воды гидрогель с добавками хризотила и полипропиленовой фибры имеет больший фактор остаточ-

ного сопротивления ($\Phi OS = 167$) в трещине с раскрытостью 100 мкм по сравнению с базовым гидрогелем ($\Phi OS = 136$) в трещине 50 мкм. При блокировании газонасыщенной модели идеальной трещины максимальный ΦOS составил 2677. Опытные-промышленные испытания состава с дисперсным и волокнистым наполнителями для ликвидации катастрофических поглощений при бурении и проведении РИО прошли успешно.

Ключевые слова: полиакриламид, органический сшиватель, гидрогель, дисперсный наполнитель, волокнистый наполнитель, ремонтно-изоляционные работы, нефтяные скважины, органо-неорганические материалы

Финансирование: исследование выполнено при частичной финансовой поддержке научно-исследовательского проекта “Разработка технологии кислотного воздействия с внутрислоевым отклонением с целью выравнивания профиля притока в карбонатных коллекторах” в рамках реализации стратегического проекта “Новые технологические решения в ТЭК” программы развития ФГБОУ ВО УГНТУ “Приоритет 2030”; исследование выполнено при частичной финансовой поддержке в рамках государственного задания ИХТТМ СО РАН (проект № 122011700261-3).

Для цитирования: Якубов Р. Н., Павлик А. С., Ленченкова Л. Е., Стрижнев В. А., Политов А. А., Гусарова Е. И., Мамыкин А. А., Тептерева Г. А., Телин А. Г. Разработка тампонажных составов на основе гидрогелей полиакриламида с дисперсными и волокнистыми наполнителями // Химия в интересах устойчивого развития. 2025. Т. 33, № 1. С. 130–143. DOI: 10.15372/KhUR2025636. EDN: RCPHOC.

Original article

Development of plugging compositions based on polyacrylamide hydrogels with dispersed and fibre fillers

R. N. YAKUBOV¹ ✉, A. S. PAVLIK¹, L. E. LENCHENKOVA¹, V. A. STRIZHNEV², A. A. POLITOV³, E. I. GUSAROVA⁴, A. A. MAMYKIN², G. A. TEPTEREVA¹, A. G. TELIN²

¹Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

²Ufa Scientific and Technical Center, Ufa, Russia

³Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

⁴Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

E-mail: rav_rb@bk.ru✉, Inplay@mail.ru, lenchenkoval@mail.ru, strijneva@ufntc.ru, anpolitov@yahoo.com, gusarovaei@ufntc.ru, mamikinaa@ufntc.ru, teptereva.tga@yandex.ru, telinag@ufntc.ru

Abstract

Development and operation of wells at oil and gas fields are often accompanied by unexpected complications related to drilling mud loss and breakthrough of gas and fluids through reservoir fractures, which requires repair and insulation operations (RIO) to be performed with adequate quality. The ways to improve the efficiency of repair and insulation operations in oil and gas wells with the use of gel-forming plugging materials are considered in the work. The use of various hydrophilic and hydrophobic dispersed and fibrous fillers in hydrogels based on polyacrylamide and complex organic crosslinker is proposed in order to improve their rheological properties and increase the blocking ability. Such organic-inorganic composites show a variety of rheological properties, which makes it possible to select the necessary hydrogel compositions for certain RIO. The results of rheological (oscillation) and filtration studies, as well as field tests of the compositions, are presented. Chrysotile, carbon black, hydrophilic nanosilica, and mechanically activated wood flour, rice husk, hydrolysed lignin were used as dispersed fillers in oscillation studies. Polypropylene fibres, basalt fibres and carbon fibres were considered as fibre fillers. The values of elastic modulus (G') and viscosity modulus (G''), crossover points and linear viscoelastic regions for

each composition were determined from the results of oscillation studies. An increase in the modulus of elasticity up to 48 % ($G' = 53.3$ Pa) was achieved with the addition of carbon black and up to 50 % ($G' = 54.2$ Pa) for the composition with chrysotile and carbon fibre, compared to the base hydrogel without fillers ($G' = 36.1$ Pa). The addition of hydrophilic nanosilica allowed an increase in the yield strength (crossover point) by more than 300 % (to 210.4 Pa). Filtration studies were performed on the ideal fracture model with different opening (50, 100, 650 μm) using natural core samples. It has been established that during water filtration the hydrogel with chrysotile and polypropylene fibre additives has a higher residual resistance factor ($\text{RRF} = 167$) in the fracture with 100 μm opening than the base hydrogel ($\text{RRF} = 136$) in the 50 μm fracture. When blocking a gas-saturated model of an ideal fracture, the maximum RRF was 2677. Field tests of the composition with dispersed and fibre fillers for elimination of catastrophic drilling mud circulation loss and RIO were successful.

Keywords: polyacrylamide, organic crosslinker, hydrogel, dispersed filler, fibre filler, repair and insulation operations, oil wells, organic-inorganic materials

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений сложного геологического строения различные технологические процессы строительства скважин и извлечения углеводородов сопровождаются рядом осложнений, таких как поглощение бурового раствора при бурении скважин; прорыв по высокопроницаемым интервалам или трещинам пласта газа из газовой шапки, а также пластовых и закачиваемых вод к забоям добывающих скважин; нарушение целостности эксплуатационной колонны, цементного камня; опережающая выработка отдельных высокопроницаемых пластов в разрезе неоднородного продуктивного коллектора. Для борьбы с такими осложнениями требуется проведение ремонтно-изоляционных работ (РИР) с применением прочных и технологичных тампонажных составов.

В качестве таких составов применяются цементные растворы, смолы, обратные эмульсии и гидрогели. Так, в [1] приведена классификация технологий борьбы с поглощением при проведении РИР, рассмотрены отверждающие (на основе цемента с различными добавками), гелеобразующие (на основе полимеров) и осадкообразующие (на основе жидкого стекла) тампонажные составы. Представлены критерии применимости различных составов для конкретных геолого-физических и технологических условий.

Опыт применения цементных составов и цементно-нефтяных суспензий показывает их невысокую эффективность (не более 27 %) [2]. В качестве тампонажного материала наибольшее применение нашли обладающие вязкоупругими свойствами гидрогели на основе полиакриламида (ПАА). К их преимуществам можно отнести возможность плавного регулирования времени сшивки и структурно-механических

свойств системы путем изменения концентрации исходных компонентов (полимера и сшивателя) и наполнителей различной природы и структуры.

В качестве сшивателя в гидрогелях, полученных из частично гидролизованых ПАА, могут применяться неорганические (соли поливалентных металлов Al^{3+} , Cr^{3+} , Fe^{3+} и др.) и органические реагенты (производные фенола и формальдегида, резорцин и уротропин, полиэтиленмин и др.) [3–5]. Тип сшивателя определяет природу связей и структурно-механические свойства получаемых гидрогелей. Так, гели, сшитые ионами металлов, образующими ионные связи с карбоксильными группами полимера, характеризуются малым временем гелеобразования при температурах выше 60–70 °С и низкой термостабильностью [6]. В то же время полимерные гели, сшитые органическими сшивателями, создающими ковалентные связи с амидными группами полимерных цепей, обладают лучшей термической стабильностью и более длительным временем гелеобразования даже при высоких температурах. Гидрогели с органическими сшивателями также характеризуются большими значениями модуля упругости [4]. Это объясняется тем, что ковалентные связи имеют, как правило, более высокую энергию связи, чем ионные [7].

Необходимо отметить, что составы на основе ПАА довольно дороги, так как в зависимости от целей их применения они характеризуются высокой концентрацией полимера (0.5–1.5 %) [8, 9].

Для решения проблемы повышения структурно-механических свойств гидрогелей с одно-временным уменьшением расхода ПАА в их состав вводятся различные дисперсные и волокнистые наполнители.

С целью увеличения эффективности применения гидрогелей в РИР рассматривалось использование природных и растительных мате-

риалов, таких как глина [10, 11], мел, мергель, гидролизный лигнин [12, 13], шелуха риса и проса [14, 15], хризотил и др. Авторами настоящей статьи ранее была предложена механоактивация дисперсных наполнителей для повышения их реакционной способности и увеличения механической прочности гидрогелей [14, 15]. Необходимо отметить, что ряд дисперсных наполнителей был выбран из числа отходов производства, что при массовом их применении позволит квалифицированно утилизировать отходы сельского хозяйства и лесохимии.

Наноразмерные добавки позволяют значительно повысить область применения гидрогелей при высоких пластовых температурах и минерализации вод. Для этих целей применяются неорганические (оксиды кремния, титана, гидроксид циркония) и органические наночастицы (целлюлоза и графен) [16–21].

Микроразмерные дисперсные наполнители играют роль коагулянтов, позволяя повысить эффективность применения тампонажных составов в трещинном пространстве продуктивного коллектора.

Волокнистые добавки дополнительно армируют изоляционную массу, при этом не снижая подвижности состава при закачке в кольцевое пространство, в то же время обладают высоким коагулирующим эффектом в трещиноватых и пористых структурах. Размеры волокон (длина) выбираются в зависимости от целей РИР (величина поглощения, приемистость интервала пласта или технологические ограничения процесса) [22]. Волокнистые наполнители также применяются и в гелях для гидроразрыва пласта с целью повышения песконесущей способности. Согласно результатам реологических исследований, с увеличением концентрации волокнистого наполнителя наблюдается увеличение кажущейся вязкости и комплексного модуля вязкоупругого геля [23].

Критерии выбора оптимальных концентраций волокнистых и дисперсных наполнителей зависят от поставленных технологических задач и структуры порового пространства пласта-коллектора. При проведении водоизоляционных работ, основываясь на интерпретации результатов гидродинамических исследований скважины, можно оценить степень трещиноватости пласта. Это позволяет корректировать концентрацию волокнистых и дисперсных наполнителей в большую или меньшую сторону для достижения максимальной эффективности водоизоляции.

В настоящей работе в качестве базового рассматривается гидрогель на основе ПАА с комплексным сшивателем фенольно-альдегидной природы.

Цель данного исследования – повышение эффективности применения гидрогелевых систем в технологических процессах при проведении РИР за счет регулирования их структурно-механических свойств дисперсными и волокнистыми нано- и микроразмерными добавками.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

Для приготовления базового гидрогеля из частично гидролизованного ПАА (1.7 %) и комплексного сшивателя, состоящего из параформа (0.15 %) и резорцина (0.05 %) [24] использовали следующие материалы: полиакриламид марки EOR-1141 (ООО “Химинтек”, Россия) с молярной массой $3 \cdot 10^6$ г/моль и степенью гидролиза 30 %; параформальдегид (ТУ 6-09-141-03-89 с изм. 1–3); резорцин квалификации “тех.” 1 сорт (ОКП 2472110130, ОАО “Уралхимпласт”). В качестве волокнистых наполнителей применяли продукцию российских производителей: полипропиленовую фибру Atren fibre (ТУ 2458-029-63121839-2011 с изм. 1–10, ООО “Миррико Комплексное Обеспечение”); базальтовое волокно рубленое (ООО “Каменный век”); углеродное волокно марки UMT (ГОСТ Р.57407-2017, ООО “Алабуга-Волокно”). Все волокнистые материалы имели длину волокна от 3 до 6 мм.

Из дисперсных наполнителей применяли: хризотил (ГОСТ 12871-2013, ПАО “Ураласбест”, Россия); механоактивированную древесную муку (ТУ 16.10.22.120-113-94862185-2017, ООО “Доза-Гран”, Россия); механоактивированную рисовую шелуху; механоактивированный гидролизный лигнин (ООО “Промышленная группа”, Россия); черную сажу CAS-RN-1333-86-4 (Китай); нанокремнезем марки HCSIL200 (Shandong Haochuang Material Co., Ltd., Китай). Исследуемые составы представлены в табл. 1.

Механоактивацию проводили на лабораторной планетарной шаровой мельнице АГО-2 разработки ИХТТМ СО РАН (Новосибирск).

Методика приготовления композитов

В пресной воде на магнитной мешалке распускали дисперсные и волокнистые наполнители в течение 10–15 мин, затем добавляли по-

ТАБЛИЦА 1

Составы гидрогеля с дисперсными и волокнистыми наполнителями

Состав	Дисперсный наполнитель	Волокнистый наполнитель
Базовый состав	–	–
Состав 1	Хризотил (1.5 %)	–
Состав 2	Механоактивированная древесная мука (1.5 %)	–
Состав 3	Механоактивированная рисовая шелуха (1.5 %)	–
Состав 4	Черная сажа (1.5 %)	–
Состав 5	Механоактивированный гидролизный лигнин (1.5 %)	–
Состав 6	Гидрофильный нанокремнезем (0.2 %)	–
Состав 7	Гидрофильный нанокремнезем (0.4 %)	–
Состав 8	Хризотил (1.5 %) и гидрофильный нанокремнезем (0.2 %)	–
Состав 9	Хризотил (1.5 %) и гидрофильный нанокремнезем (0.4 %)	–
Состав 10	Хризотил (1.5 %)	Полипропиленовая фибра (0.15 %)
Состав 11	Хризотил (1.5 %)	Базальтовое волокно (0.15 %)
Состав 12	Хризотил (1.5 %)	Углеродное волокно (0.15 %)
Состав 13	Древесная мука (1.5 %)	Полипропиленовая фибра (0.075 %) и базальтовое волокно (0.075 %)
Состав 14	Древесная мука (1.5 %)	Углеродное волокно (0.075 %) и базальтовое волокно(0.075 %)

Примечание. Прочерк – наполнитель не добавляли.

лимер со сшивателем. Полученный состав перемешивали в течение 45 мин или до полного растворения полимера. По истечении 48 ч производили осцилляционные и фильтрационные исследования.

Методы исследования

Выполнены реометрические осцилляционные и фильтрационные исследования приготовленных гидрогелей, а также определение размеров частиц дисперсных материалов.

Осцилляционные исследования. Осцилляционные исследования проводили с применением ротационного вискозиметра Rheotest RN5.1 (Rheotest Medingen GmbH, Германия) с изме-

рительной системой “плоскость – пластина” при 24 °С. Диаметр измерительной пластины $D = 36$ мм, зазор между пластинами $h = 1$ мм (рис. 1).

На пластину с помощью шприца-дозатора наносят необходимый объем гидрогеля, затем с помощью микрометра выставляют зазор 1 мм между пластинами. Излишек гидрогеля убирают специальными щипцами так, чтобы пространство между пластинами было полностью заполнено измеряемой жидкостью.

Осцилляционные исследования выполняли с разверткой по напряжению сдвига (τ), при частоте колебаний (ν) в 1 Гц. Основные измеряемые параметры: модуль упругости (G'), модуль вязкости (G''), точка кроссовера (точка пересечения G' и G''), соответствующая пределу текучести, а также линейный диапазон измерения (ЛДИ). В ходе экспериментов производили несколько замеров, результаты которых затем усредняли и рассчитывали стандартное отклонение.

Исследования на фильтр-прессе в режиме скрин-вискозиметра. В ячейку фильтр-пресса ФЛР-2 (Россия) загружали исследуемый состав после 16 ч созревания. Объем ячейки – 156 мл, загрузка тампонажного состава – 150 мл, рабочее давление от компрессора – 0.7 МПа. Тип фильтра – щелевой (параметры щели фильтра: ширина 1.0 мм, длина 30 мм). Температура проведения тестов – 20 °С. В ходе эксперимента определяли время истечения исследуемого состава.

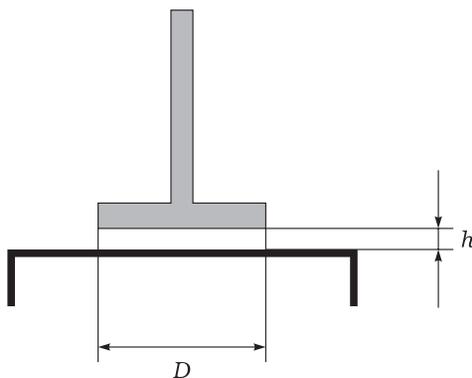


Рис. 1. Измерительная система “плоскость – пластина”, где D – диаметр пластины, h – зазор между пластинами.

Определение размеров частиц. Распределение частиц по размерам и средний размер частиц определяли с помощью лазерного дифракционного анализатора SALD-2300 (Shimadzu, Япония) в проточной ячейке SALD-MS23, позволяющей измерять размер частиц в диапазоне от 17 нм до 2500 мкм.

Измерение размеров для гидрофильных частиц (хризотил, древесная мука, рисовая шелуха, гидрофильный нанокремнезем) проводили в дистиллированной воде, гидрофобных (механоактивированный гидролизный лигнин, черная сажа) – в изопропиловом спирте (табл. 2). Для расчета размера частиц сажи и нанокремнезема их коэффициенты преломления приняли равными 1.50 [25] и 1.48 [26] соответственно.

Фильтрационные исследования. Подготовку ядерного материала и фильтрационные исследования проводили согласно требованиям, описанным в [27].

При создании модели идеальной трещины (щелевая модель), представленной на рис. 2, были использованы естественные образцы ядра, что позволило удовлетворительно воспроизвести условия естественной смачиваемости.

ТАБЛИЦА 2

Размеры частиц дисперсных наполнителей

Наполнитель	Средний диаметр (медиана), мкм
Хризотил	109.277
Механоактивированная древесная мука	44.216
Механоактивированная рисовая шелуха	18.555
Механоактивированный гидролизный лигнин	13.934
Черная сажа	0.062
Гидрофильный нанокремнезем	0.043

Далее цилиндрические образцы ядра склеивали между собой так, чтобы получилась составная модель пористой среды длиной не менее 11.2 см. Полученные составные модели пористой среды распиливали вдоль, затем половинки подбирали так, чтобы щелевая модель имела цилиндрическую форму. После отшлифовки соприкасающихся поверхностей щелевой модели на одну из половинок наклеивали полоски фольги заданной толщины (для создания задан-

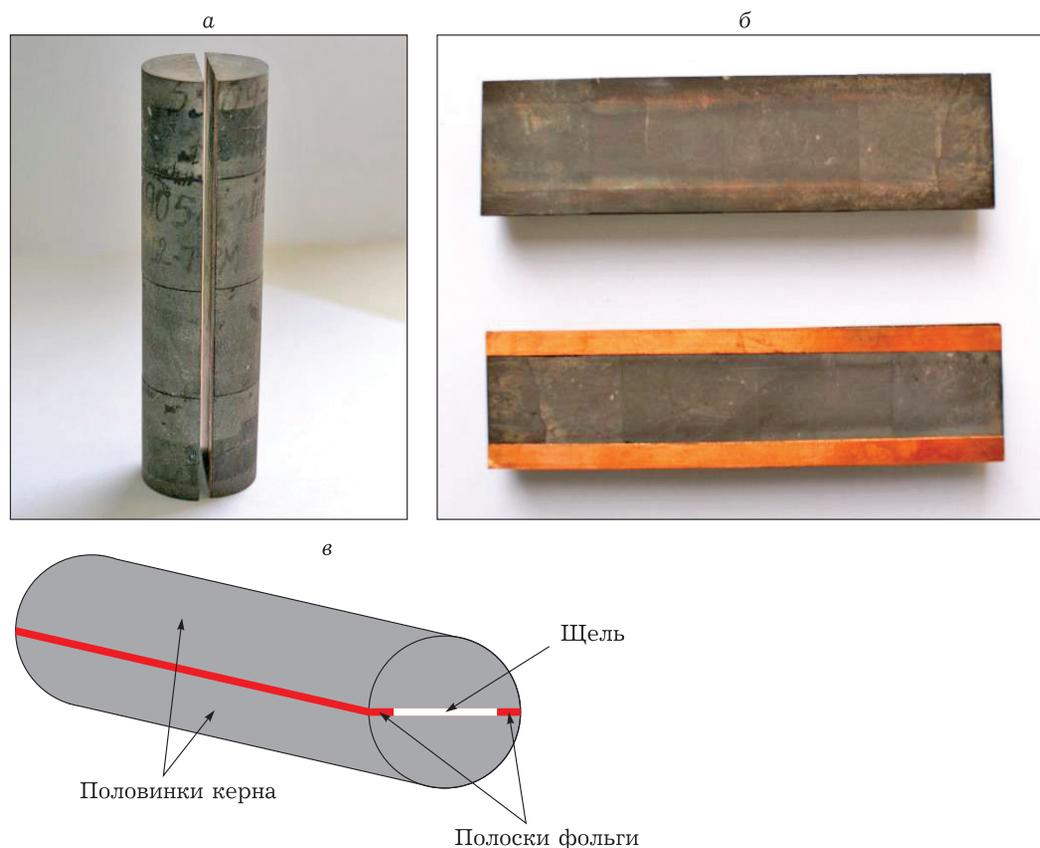


Рис. 2. Изображение модели идеальной трещины: фото распиленного ядра (а) и распиленных половинок ядра с наклеенными полосками фольги (б); схема идеальной трещины (в).

ной величины раскрытости трещины). Параметры изготовленной модели идеальной трещины: длина 11.2 см; ширина 1.7 см; номинальный зазор (раскрытость щели) 50, 100 и 650 мкм; ориентация в пространстве – горизонтальная.

Фильтрационные исследования проводили на установке СМП ФЕС-2Р (ООО “КорТех”, Россия). Технические характеристики установки: линейная длина керновой модели 100–300 мм, диапазон регулирования температуры керна 25–150 °С, максимальное горное давление 70 МПа, максимальное пластовое давление 55 МПа.

Перед каждым опытом поверхность щелевой модели тщательно подготавливали: очищали от загрязнений, промывали водой и спиртовым раствором. Модель идеальной трещины помещали в кернодержатель фильтрационной установки исследования керна и фильтровали необходимый объем гидрогеля.

Для каждой модели на первом этапе осуществлялась фильтрация воды/газа в прямом направлении в объеме не менее 10 см³ до стабилизации градиента давления. Затем осуществлялась фильтрация нефти в прямом направлении в объеме не менее 10 см³ до стабилизации градиента давления.

На следующем этапе осуществлялась фильтрация воды/газа в прямом направлении с постоянным расходом (0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 и 15.0 см³/мин) в объеме не менее 10 см³ до стабилизации градиента давления, при этом на каждом этапе определялась проницаемость по воде/газу.

Далее в модель идеальной трещины в направлении, обратном первоначальному, закачивали тампонирующий состав в объеме, не превышающем 10 см³. После этого производился технологический отстой системы в статических условиях не менее 24 ч.

Затем закачивалась вода/газ в прямом направлении с постоянным расходом (0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 и 15.0 см³/мин) в объеме не менее 10 см³ до стабилизации градиента давления, при этом на каждом этапе определялись проницаемость по воде/газу и максимальный градиент давления.

В результате рассчитывался фактор остаточного сопротивления (ФОС) – отношение перепада давления по воде/газу после закачки состава к перепаду давления до воздействия реагента:

$$\text{ФОС} = dP_i/dP_1 \quad (1)$$

где dP_i – перепад давления по флюиду после проведения воздействия на соответствующем

этапе фильтрации; dP_1 – перепад давления по флюиду до воздействия состава.

Для эксперимента использовались флюиды со следующими характеристиками: 1) вода – пластовая вода (вязкость 1.62 мПа·с); 2) газ – азот (0.01795 мПа·с); 3) нефть – изовязкозная нефть (1.6 мПа·с). Эксперименты проводились при температуре 29 °С.

Опытно-промысловые испытания. Опытно-промышленные работы по ликвидации зон поглощения проведены в четырех скважинах месторождений Республики Башкортостан. При этом в двух скважинах работы по изоляции последовательно проводились в двух интервалах: в одной скважине – по изоляции зон поглощения в серпуховском ярусе, а затем в кыновском горизонте; во второй скважине – по изоляции зон поглощения в серпуховском ярусе при бурении пилотного, а затем транспортного ствола.

Также были проведены РИР в двух действующих скважинах (X1 и X2) одного из нефтяных месторождений Западной Сибири.

Цель РИР на скважине X1 – снижение приемистости изолируемого пласта ПК₁₂² перед его цементированием. Закачку полимерной композиции производили в два этапа по 10 м³ (на 1 м³ раствора использовали следующие компоненты: полимерный состав – 25 кг, фибра – 1.5 кг, хризотил – 15 кг) при конечном давлении 120 атм. Приемистость пласта после закачки состава – 432 м³/сут при давлении 60 атм.

Цель РИР на скважине X2 – изоляция интервала негерметичности в эксплуатационной колонне. После приготовления тампонажного состава производили его закачивание в насосно-компрессорные трубы при максимальном расходе цементировочного агрегата марки ЦА-320 в объеме 10 м³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты осцилляционных исследований

Результаты осцилляционных исследований (средние значения и стандартные отклонения определяемых параметров) для исходного гидрогеля (базовый состав) и гидрогеля с различными дисперсными наполнителями (составы 1–5 и 7) приведены в табл. 3. На рис. 3 представлены характерные зависимости G' и G'' от τ для базового состава (см. рис. 3, а) и гидрогеля с нанокремнеземом (см. рис. 3, б, состав 7). Так, наибольшее изменение механических свойств по сравнению с базовым гидрогелем наблюдается в

ТАБЛИЦА 3

Результаты осцилляционных исследований составов гидрогеля с различными дисперсными наполнителями

Состав	Модуль упругости G' , Па	Модуль вязкости G'' , Па	Комплексный модуль G^* , Па	Кроссовер, Па	ЛДИ, Па
Базовый состав	<u>36.1</u> 0.9	<u>20.9</u> 1.0	<u>41.7</u> 1.3	<u>50.5</u> 1.6	<u>28.7</u> 2.3
Состав 1	<u>39.7</u> 1.3	<u>21.9</u> 0.5	<u>45.3</u> 0.9	<u>52.2</u> 1.4	<u>32.5</u> 2.2
Состав 2	<u>48.7</u> 4.5	<u>25.7</u> 2.7	<u>55.1</u> 5.2	<u>62.5</u> 3.6	<u>38.6</u> 3.9
Состав 3	<u>35.7</u> 2.1	<u>19.4</u> 1.6	<u>40.7</u> 2.6	<u>46.9</u> 3.7	<u>30.1</u> 2.2
Состав 4	<u>53.3</u> 5.6	<u>27.6</u> 2.5	<u>60.0</u> 6.0	<u>65.3</u> 4.7	<u>45.4</u> 3.1
Состав 5	<u>32.8</u> 0.3	<u>22.7</u> 0.6	<u>39.9</u> 0.4	<u>43.2</u> 1.2	<u>28.7</u> 2.3
Состав 7	<u>49.6</u> 4.3	<u>23.9</u> 1.9	<u>55.0</u> 4.6	<u>210.4</u> 5.3	<u>34.7</u> 3.7

Примечание. Здесь и в табл. 4–6: 1. ЛДИ – линейный диапазон измерения; кроссовер – напряжение сдвига, при котором пересекаются кривые модулей упругости и вязкости (предел текучести). 2. В числителе указано среднее значение, в знаменателе – стандартное отклонение.

случаях добавки древесной муки, черной сажи и гидрофильного нанокремнезема, а именно, значительно увеличиваются характеристики составов соответственно: G' – с 36.1 до 48.7, 53.3 и 49.6 Па; G'' – с 20.9 до 25.7, 27.6 и 23.9 Па; величина касательного напряжения в точке кроссовера – с 50.5 до 62.5, 65.3 и 210.4 Па; ЛДИ – с 28.7 до 38.6, 45.4 и 34.7 Па. При этом добавка рисовой шелухи не привела к улучшению механических свойств состава, а добавка механоактивированного гидролизного лигнина даже незначительно понизила все реологические параметры. Повторные измерения состава с механоактивиро-

ванным гидролизным лигнином спустя 96 и 144 ч также не показали улучшения реологических свойств. В то же время главная задача дисперсного наполнителя в тампонажных составах – увеличение эффективности воздействия на поглощающие интервалы – с использованием гидролизного лигнина достигнута, а для проведения водо- и газоизоляционных работ необходимо увеличение структурно-механических свойств, которое обеспечивают другие вышеозначенные дисперсные и волокнистые материалы.

Поверхность механоактивированных древесных частиц проявляет амфифильные свойства

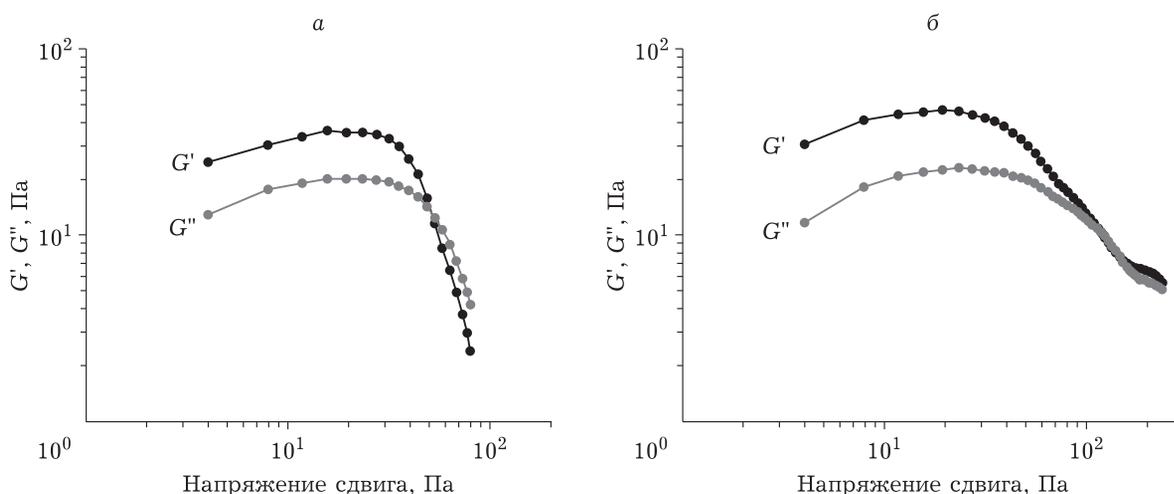


Рис. 3. Зависимости модулей упругости и вязкости от напряжения сдвига гидрогелей: а – базовый состав; б – состав 7, содержащий 0.4 % гидрофильного нанокремнезема. Здесь и на рис. 5: G' и G'' – модули упругости и вязкости соответственно.

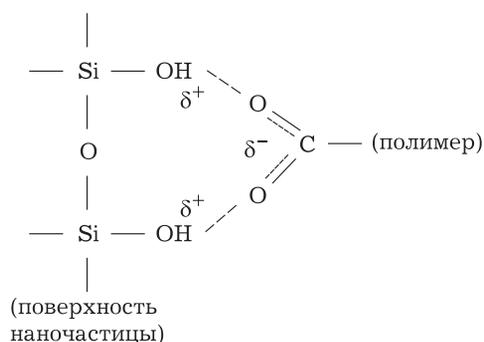


Рис. 4. Схема взаимодействия наночастиц оксида кремния и полиакриламида.

за счет гидрофильной целлюлозы и гидрофобных таннидных полифенольных структур. Данная дисперсия имеет сродство как к гидрофильным, так и к гидрофобным фрагментам ПАА.

Черная сажа представляет собой химически активный аморфный углерод с наноразмерным распределением частиц и, предположительно, будет взаимодействовать с основной цепочкой полимера за счет гидрофобного эффекта.

Механизм упрочнения геля при добавке нанокремнезема можно объяснить образованием водородной связи между карбоксильными группами гидролизованного ПАА и силанольными функциональными группами на поверхности наночастиц диоксида кремния (рис. 4), что подтверждается исследованием ИК-спектров гидрогеля с нанокремнеземом, выполненным в [28].

Наиболее заметное увеличение структурно-механических свойств в случае добавок нанокремнезема, видимо, объясняется тем, что последний образует дополнительные узлы в сетчатой структуре гидрогеля.

Добавка рисовой шелухи в полиакриламидный гидрогель не сказалась на его структурно-механических свойствах, в то время как введение шелухи в органо-неорганический гидрогель заметно увеличило упругие свойства тампонажного материала [14].

В табл. 4 представлены результаты осцилляционных исследований для двух составов: первый – с хризотилом, второй – с хризотилом совместно с нанокремнеземом (0.2 %). Как видно, сочетание указанных реагентов не привело к статистически значимому изменению характеристик гидрогеля.

Изучение кольтатирующей способности гидрогелей с нано- и микроразмерным наполнителем было проведено на фильтр-прессе, работающем в режиме скрин-вискозиметра [29, 30]. Определяемый параметр – время истечения тампонажного состава через щелевой фильтр с шириной щели 1 мм – для базового состава составил 11 с, а для составов 1, 6, 7, 8 и 9 – соответственно 21, 18, 23, 28, 32 с. Введение хризотила в базовый состав почти вдвое увеличивает время его истечения. Замена хризотила нанокремнеземом (состав 7) также приводит к заметному увеличению времени истечения. Совместное же введение микроразмерной добавки (хризотил) и наноразмерной добавки (кремнезем) увеличивает время истечения почти втрое (состав 9). Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения состава 9 для снижения поглощений в трещиноватых пластах.

Дальнейшие исследования были направлены на поиск эффективных волокнистых наполнителей, в качестве которых рассмотрены полипропиленовая фибра, базальтовое и углеродное волокна (табл. 5). На рис. 5 приведены характерные зависимости модулей упругости и вязкости от напряжения сдвига для гидрогеля с хризотилом и углеродным волокном (состав 12).

Как видно (см. табл. 5), при добавке полипропиленового и углеродного волокнистых наполнителей в гидрогель с хризотилом значительно увеличиваются G' (составы 1, 10, 12) – с 39.7 до 44.6 и 54.2 Па и G'' – с 21.9 до 24.6 и 30.4 Па соответственно. Отмечено постоянство величины точки кроссовера – около 50 Па. Параметр ЛДИ не изменился для состава с полипропиленовым

ТАБЛИЦА 4

Результаты осцилляционных исследований составов гидрогеля с микроразмерным хризотилом и наноразмерным кремнеземом

Состав	Модуль упругости G' , Па	Модуль вязкости G'' , Па	Комплексный модуль G^* , Па	Кроссовер, Па	ЛДИ, Па
Состав 1	39.7	21.9	45.3	52.2	32.5
	1.3	0.5	0.9	1.4	2.2
Состав 8	43.3	25.9	50.5	52.1	29.1
	4.3	3.2	5.4	2.8	2.4

Примечание. Обозн. см. табл. 3.

ТАБЛИЦА 5

Результаты осцилляционных исследований составов гидрогеля с различными волокнистыми наполнителями

Состав	Модуль упругости G' , Па	Модуль вязкости G'' , Па	Комплексный модуль G^* , Па	Кроссовер, Па	ЛДИ, Па
Состав 1	39.7	21.9	45.3	52.2	32.5
	1.3	0.5	0.9	1.4	2.2
Состав 10	44.6	24.6	50.9	51.8	32.3
	2.8	1.1	2.9	0.7	2.3
Состав 11	40.8	22.3	46.5	49.4	31.2
	3.5	1.0	3.6	3.2	0.1
Состав 12	54.2	30.4	62.1	51.4	25.6
	4.5	1.0	4.4	0.2	2.3

Примечание. Обозн. см. табл. 3.

волокном, но уменьшился для углеродного волокна – с 32.5 до 25.6 Па. При этом добавка базальтового волокна не привела к значительным изменениям свойств состава в сравнении с составом без волокнистого наполнителя.

Следует отметить, что повышение структурно-механических свойств произошло при добавке гидрофобных волокон (полипропиленовой фибры и углеродного волокна), тогда как гидрофильное волокно (базальтовое) не повлияло на характеристики геля.

Также исследованы составы с одновременным добавлением волокнистых наполнителей гидрофильной и гидрофобной природы – базальтовое и углеродное волокна, базальтовое и полипропиленовое волокна (табл. 6). В качестве дисперсного наполнителя (как комплексный связующий) была выбрана древесная мука (см. табл. 6, составы 13, 14), которая, как отмечалось ранее, обладает двойственной природой смачиваемости. Необходимо отметить, что совместное введение волокнистых и дисперсного наполнителей хотя и не привело к увеличению значений реологических параметров, тем не менее, позволяет значительно повысить фильтрационные сопротивления в трещинных структурах.

Результаты фильтрационных исследований

Цель данных экспериментов – определение водо- и газоизолирующих свойств тампонажного состава в трещиноватых пластах. Результаты фильтрационных исследований базового состава гидрогеля и состава 10 (с хризотилом и полипропиленовой фиброй) приведены в табл. 7. Как видно из представленных данных, базовый состав исследовался на модели идеальной трещины с раскрытостью (шириной) 50 мкм. При фильтрации воды через трещину с увеличением расхода от 0.1 до 15 см³/мин максимальный гра-

диент давления монотонно изменялся от 4.2 до 14.7 МПа/м, установившийся градиент давления увеличивался от 2.6 до 12.9 МПа/м, а остаточный фактор сопротивления уменьшился от 136.5 до 15.1 (опыт 1). На газонасыщенной модели трещины при фильтрации газа максимальный ФОС составил 2677 (расход 0.1 см³/мин), а максимальный градиент давления – 19.6 МПа/м (расход 1 см³/мин). Следует отметить, что при увеличении расхода газа с 1 до 5 см³/мин (и при увеличении градиента давления свыше 20 МПа/м) происходит резкое снижение градиента давления и ФОС, что свидетельствует о прорыве газа сквозь изоляционный состав (опыт 2). В случае с фильтрацией воды с ростом расхода происходит плавное снижение ФОС, сопровождающееся ростом установившегося давления (не превышающем 20 МПа/м). Это связано с тем, что вода фильтруется сквозь матрицу гидрогеля, не вызывая его значительного разрушения.

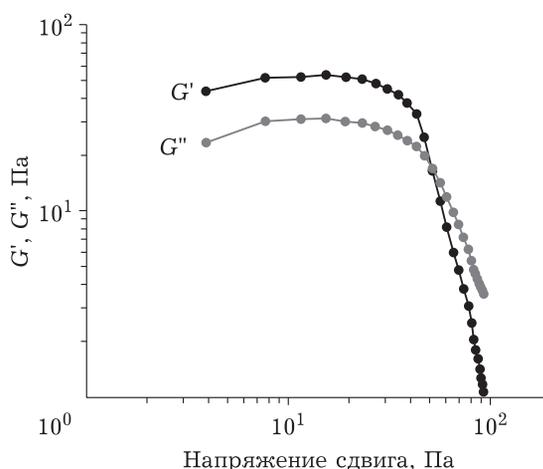


Рис. 5. Зависимости модулей упругости и вязкости от напряжения сдвига гидрогеля с хризотилом и углеродным волокном (состав 12). Обозн. см. рис. 3.

ТАБЛИЦА 6

Результаты осцилляционных исследований составов гидрогеля в комбинации с волокнистыми наполнителями гидрофильной и гидрофобной природы

Состав	Модуль упругости G' , Па	Модуль вязкости G'' , Па	Комплексный модуль G^* , Па	Кроссовер, Па	ЛДИ, Па
Базовый состав	<u>36.1</u>	<u>20.9</u>	<u>41.7</u>	<u>50.5</u>	<u>28.7</u>
	0.9	1.0	1.3	1.6	2.3
Состав 1	<u>39.7</u>	<u>21.9</u>	<u>45.3</u>	<u>52.2</u>	<u>32.5</u>
	1.3	0.5	0.9	1.4	2.2
Состав 13	<u>27.2</u>	<u>16.8</u>	<u>32.0</u>	<u>35.4</u>	<u>21.6</u>
	3.0	1.2	3.2	2.7	2.8
Состав 14	<u>37.7</u>	<u>20.6</u>	<u>43.0</u>	<u>50.1</u>	<u>28.6</u>
	2.7	2.7	3.80	1.8	2.1

Примечание. Обозн. см. табл. 3.

Для трещин с большей раскрытостью (100 и 650 мкм, опыты 3–6) был выбран состав 10 с волокнисто-дисперсными наполнителями. Добавка наполнителей в базовый состав необходима для увеличения ФОС в условиях наличия трещин значительных размеров. При этом наполнители приводят к армированию состава и упрочнению структуры, и, как следствие, к увеличению ФОС.

При фильтрации воды в опыте 3 с расходом до 1 см³/мин наблюдаются значения ФОС, превосходящие соответствующие результаты опыта 1; величина ФОС составляет 167.2 при расходе 0.1 см³/мин и максимальном градиенте давления 3.0 МПа/м. При увеличении расхода воды (5–15 см³/мин) ФОС принимает значения 9.5–10. По газу (опыт 4) наблюдается картина, схожая с опытом 2, однако прорыв газа происходит при меньшем расходе газа – 0.5 см³/мин (ФОС падает с 1105.7 до 35.6, установившийся градиент давления – с 2.43 до 0.12 МПа/м), что связано с увеличением раскрытости трещины в 2 раза (до 100 мкм).

При раскрытости трещины 650 мкм (опыт 5) максимальный ФОС при фильтрации воды составил 63.4 (расход 0.1 см³/мин). В диапазоне расхода 1–15 см³/мин ФОС стабилизируется в пределах 3.5–5.4. Максимальный градиент давления, равный 8.5 МПа/м, достигнут при расходе 5 см³/мин. При фильтрации газа (опыт 6) максимальный ФОС составил 354, при больших расходах ФОС снизился до 2.2.

Полученные в ходе фильтрационных тестов результаты свидетельствуют о перспективности применения разработанных тампонажных составов для водо- и газоизоляции скважин.

Результаты опытно-промысловых испытаний

Опытно-промысловые работы проводились при строительстве скважин для ликвидации ката-

строфических поглощений бурового раствора. Эффект изоляции (значительное снижение приемистости поглощающего интервала) достигнут по всем четырем скважинам месторождений Республики Башкортостан, кроме одной заливки по изоляции зон поглощения в интервале залегания пластов серпуховского яруса. По результатам проведенных работ состав 10 был рекомендован для расширенного внедрения в ПАО АНК “Башнефть”.

Следующие опытные работы были проведены в поглощающих пластах при капитальном ремонте скважин на одном западносибирском месторождении, приуроченном к покурской свите. Так, на скважине X1 после закачки состава 1 в целевой интервал приемистость пласта составила 432 м³/сут при давлении 60 атм. В результате проведенных работ отмечено:

- отсутствие технологических осложнений при приготовлении и закачке составов;
- зафиксирован необходимый рост давления; достигнута полная циркуляция;
- отсутствует необходимость проведения дополнительных работ перед цементированием на скважине (дальнейший цементаж пласта ПК²₁₂ проведен за одну операцию без осложнений).

На скважине X2 была выполнена изоляция интервала негерметичности эксплуатационной колонны, приемистость которого составляла 720 м³/сут при устьевом давлении 0 атм. В процессе закачки тампонирующего состава на основе гидрогеля с дисперсно-волокнистыми наполнителями начальное давление составило 0 атм, конечное давление поднялось до 100 атм. После 13 ч выдержки (время созревания тампонажного состава) перед изоляцией интервала негерметичности в эксплуатационной колонне цементным раствором повторно определили приемистость, которая составила 308 м³/сут при

ТАБЛИЦА 7

Результаты фильтрационных исследований тампонажных составов

№ опыта	Состав	Раскрытость щели, мкм	Фильтруемый флюид	Расход, см ³ /мин	Максимальный градиент давления после закачки состава, МПа/м	Установившийся градиент давления, МПа/м	ФОС*
1	Базовый состав	50	Пластовая вода	0.1	4.1752	2.6098	136.47
				0.5	5.2420	4.7393	116.44
				1	7.3100	5.2009	77.6
				5	9.7862	7.3375	26.32
				10	11.1371	9.9125	17.59
				15	14.6745	12.9107	15.06
2	Базовый состав	50	Газ	0.1	16.2646	9.5634	2677.64
				0.5	14.2400	13.8429	1938.04
				1	19.6080	18.6509	1160.48
				5	0.9429	0.7125	9.97
				10	0.5178	0.4170	3.24
				15	0.5688	0.5670	2.98
3	Состав 10	100	Пластовая вода	0.1	3.0291	2.4759	167.25
				0.5	4.0128	3.1634	162.94
				1	2.7749	2.2750	89.30
				5	2.3377	1.5920	10.07
				10	3.9092	2.8732	9.47
				15	5.2652	4.1634	9.46
4	Состав 10	100	Газ	0.1	6.1263	2.4348	1105.74
				0.5	0.2641	0.1214	35.60
				1	0.3152	0.1777	24.84
				5	0.1837	0.1402	13.12
				10	0.2997	0.3116	3.56
				15	0.4150	0.4000	3.34
5	Состав 10	650	Пластовая вода	0.1	2.9453	0.6625	63.42
				0.5	3.3419	0.1205	8.72
				1	4.2259	0.0813	5.38
				5	8.4853	0.1339	4.72
				10	1.6022	0.3723	4.26
				15	2.0607	0.6027	3.51
6	Состав 10	650	Газ	0.1	0.0064	0.3161	354.00
				0.5	0.0005	0.0277	15.55
				1	0.0002	0.0179	5.00
				5	0.0003	0.0241	2.98
				10	0.0022	0.1286	2.49
				15	0.0030	0.1804	2.19

* Фактор остаточного сопротивления.

давлении 70 атм. Таким образом, в ходе проведения РИР достигнуты все планируемые критерии эффективности данного состава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам осцилляционных исследований гидрогелей с дисперсными наполнителями выявлено, что наибольшие значения модуля

упругости G' демонстрируют составы с добавками механоактивированной древесной муки, черной сажи и гидрофильного нанокремнезема (48.7, 53.3 и 49.6 Па соответственно) в сравнении с модулем упругости базового гидрогеля без наполнителей (36.1 Па). При этом предел текучести (точка кроссовера) для этих составов также увеличивается до 62.5, 65.3 и 210.4 Па соответственно в сравнении с базовым гидрогелем (50.5 Па).

Добавление волокнистых наполнителей увеличивает значения G' составов, однако не влияет на предел текучести. Так, лучшие результаты показал гидрогель с хризотилом и базальтовым волокном – величина G' достигла значения 54.2 Па.

Фильтрационные исследования, проведенные на модели идеальной трещины (с раскрытостью 50, 100, 650 мкм) с использованием естественно-го образца керна, также показали высокую эффективность исследуемых составов для блокирования потоков воды и газа. Так, в трещине с раскрытостью 50 мкм базовый состав позволил достичь величины ФОС 136.5, максимальный градиент давления при увеличении расхода воды составил 14.7 МПа/м (при ФОС = 15.1). При фильтрации газа получен максимальный ФОС (2677.6,) а максимальный градиент давления, после которого произошел прорыв газа – 19.6 МПа/м. Для трещины большей раскрытости (100 мкм) применен состав с хризотилом и полипропиленовым волокном, в которой максимальный ФОС при фильтрации воды составил 167.25, а максимальный достигнутый градиент давления – 5.3 МПа/м. В случае же фильтрации газа ФОС оказался равным 1105.7, а максимальный достигнутый градиент давления – 6.1 МПа/м. При раскрытости трещины 650 мкм для воды и газа получены значения ФОС, равные 63.4 и 354.0 соответственно.

С учетом исследованных волокнистых, микро- и нанодисперсных наполнителей область эффективного применения технологий на основе предложенных гидрогелей включает поровые коллекторы с проницаемостью не менее 100 мД (базовый состав или состав с нанокремнеземом), трещиноватые и кавернозно-трещиноватые коллекторы (гидрогели с микродисперсными и волокнистыми наполнителями) с пластовой температурой до 100 °С.

Опытно-промысловые испытания, проведенные на шести скважинах, оказались успешными как при ликвидации катастрофических поглощений буровых растворов, так и для отключения пласта и ликвидации негерметичности эксплуатационной колонны скважины, что на нефтепромысловой практике подтвердило правильность выбранного подхода.

Представленные в работе результаты исследований показывают перспективность применения дисперсных и волокнистых наполнителей в гидрогелях для повышения их структурно-механических свойств, что особенно актуально

при проведении РИР по водо- и газоизоляции в трещиноватых коллекторах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Никулин В. Ю., Шаймарданов А. Р., Мукминов Р. Р., Нигматуллин Т. Э., Апкаримова Г. И., Габбасов Б. М., Давлетбердина И. Б., Андреев А. Е., Абдуллин А. Ф. Обоснование выбора технологий для борьбы с поглощением тампонажных составов при проведении ремонтно-изоляционных работ на месторождениях ООО «РН-Пурнефтегаз» // Нефтяное хоз-во. 2022. № 10. С. 48–54.
2. Шайдуллин В. А., Пресняков А. Ю., Костюченко С. А., Бурмистров А. С. Опыт применения ремонтно-изоляционных работ с применением нефцецементных растворов на месторождениях ООО «РН-Пурнефтегаз» // Науч.-техн. вестн. ОАО «НК «Роснефть». 2013. № 2 (31). С. 48–50.
3. Sun Y., Fang Y., Chen A., You Q., Dai C., Cheng R., Liu Y. Gelation behavior study of a resorcinol-hexamethyleneteramine crosslinked polymer gel for water shut-off treatment in low temperature and high salinity reservoirs // Energies. 2017. Vol. 10, No. 7. Art. 913.
4. Al-Muntasheri G. A., Nasr-El-Din H. A., Zitha P. L. J. Gelation kinetics and performance evaluation of an organically crosslinked del at high temperature and pressure // SPE J. 2008. Vol. 13, No. 3. P. 337–345.
5. Кетова Ю. А., Галкин С. В., Вотинов А. С., Канг В., Янг Х. Анализ мирового опыта применения технологий выравнивания профилей приемистости на основе сшитых полимерных гелей // Вестн. Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2020. Т. 20, № 2. С. 150–161.
6. Moradi-Araghi A. A review of thermally stable gels for fluid diversion in petroleum production // J. Pet. Sci. Eng. 2000. Vol. 26, No. 1–4. P. 1–10.
7. Liu Y., Dai C., Wang K., Zou C., Gao M., Fang Y., Zhao M., Wu Y., You Q. Study on a novel crosslinked polymer gel strengthened with silica nanoparticles // Energy Fuels. 2017. Vol. 31, No. 9. P. 9152–9161.
8. Seright R., Brattekas B. Water shutoff and conformance improvement: an introduction // Pet. Sci. 2021. Vol. 18, No. 2. P. 450–478.
9. Сафаров Ф. Э., Гусарова Е. И., Каразеев Д. В., Арсланов И. Р., Телин А. Г., Докичев В. А. Получение гидрогелей полиакриламида для ограничения водопритоков при разработке нефтегазовых месторождений // Журн. приклад. химии. 2018. Т. 91, № 5. С. 755–759.
10. Salimi F., Sefti M. V., Jarrhian K., Rafipoor M., Ghorashi S. S. Preparation and investigation of the physical and chemical properties of clay-based polyacrylamide/Cr(III) hydrogels as a water shut-off agent in oil reservoirs // Korean J. Chem. Eng. 2014. Vol. 31, No. 6. P. 986–993.
11. Chen L., Li G., Chen Y., Zeng H., Mao Z., Liu L., Wang X., Xu S. Thixotropy research of laponite-hydrogel composites for water shutoff in horizontal wells // J. Pet. Sci. Eng. 2022. Vol. 208, Part D. Art. 109600.
12. Шпуров И. В. Научно-методическое обоснование эффективной разработки трудноизвлекаемых запасов нефти юрских отложений Западной Сибири на основе детального геолого-технологического моделирования: дис. ... д-ра техн. наук. Тюмень, 2015. 356 с.
13. Шпуров И. В., Дудин С. И., Николаева Т. М., Абатуров С. В., Рамазанов Д. Ш., Старкова Н. Р. Разработка и промышленное применение лигниносодержащих соста-

- вов для повышения нефтеотдачи пластов в различных геологических условиях // Изв. высш. учеб. заведений. Нефть и газ. 2002. № 3 (33). С. 33–41.
14. Телин А. Г., Ахметов А. Т., Ленченкова Л. Е., Политов А. А., Фахреева А. В., Якубов Р. Н. Разработка вязкопластичных и вязкоупругих силикатсодержащих составов, армированных шелухой риса, для водоизоляции в нефтяных скважинах // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 4. С. 37–48.
 15. Телин А. Г., Политов А. А., Корнилов А. В., Ленченкова Л. Е., Якубов Р. Н., Сафуанова Р. М. Переработка природных возобновляемых материалов в тампонажные составы для водоизоляции в нефтяных скважинах // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 3. С. 17–26.
 16. Lu S., Bo Q., Zhao G., Shaikh A., Dai C. Recent advances in enhanced polymer gels for profile control and water shutoff: a review // Front. Chem. 2023. Vol. 11. Art. 1067094.
 17. Telin A., Lenchenkova L., Yakubov R., Poteshkina K., Krisanova P., Filatov A., Stefantsev A. Application of hydrogels and hydrocarbon-based gels in oil production processes and well drilling // Gels. 2023. Vol. 9, No. 8. Art. 609.
 18. Du J., Wang Q., Liu P., Xiong G., Chen P., Chen X., Liu J. Nanocomposite gels for water shut-off and temporary plugging in the petroleum industry: a review // Pet. Sci. Technol. 2023. Vol. 41, No. 23. P. 2204–2239.
 19. Cui X., Wang C., Huang W., Zhang S., Chen H., Wu B., Qin D., Zheng X. Multiple hydrogen bonding-assisted high-strength hydrogel of silica/polyacrylamide nanocomposite cross-linked with polyethylenimine // ACS Omega. 2023. Vol. 8, No. 42. P. 39401–39407.
 20. Jia H., Niu C.-C., Yang X.-Y. Improved understanding nanocomposite gel working mechanisms: from laboratory investigation to wellbore plugging application // J. Pet. Sci. Eng. 2020. Vol. 191, No. 1. Art. 107214.
 21. Cao J., Song T., Wang X., Zhu Y., Wang S., Zhao M., Miao Y., Zhang J. Studies on the rheological properties of amphiphilic nanosilica and a partially hydrolyzed polyacrylamide hybrid for enhanced oil recovery // Chem. Eng. Sci. 2019. Vol. 206. P. 146–155.
 22. Кадыров Р. Р., Жиркеев А. С., Сахапова А. К., Хасанова Д. К., Фаттахов И. Г. Ограничение притока пластовых вод в терригенных и карбонатных коллекторах // Территория “НЕФТЕГАЗ”. 2017. № 5. С. 48–56.
 23. Jiang Q., Jiang G., Wang C., Yang L., Ren Y., Liu P., Shi Y. The influence of fiber on the rheological properties, microstructure and suspension behavior of the supramolecular viscoelastic fracturing fluid // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2016. Vol. 35, Part A. P. 1207–1215.
 24. Пат. RU 2553816 C1, 2015.
 25. Левашенко Г. И., Симоньков В. В. Определение оптических постоянных сажи в продуктах сгорания углеводородного топлива при $\lambda = 10.6$ мкм // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 1. P. 70–73.
 26. Khlebtsov B. A., Khanadeev V. A., Khlebtsov N. G. Determination of the size, concentration, and refractive index of silica nanoparticles from turbidity spectra // Langmuir. 2008. Vol. 24, No. 16. P. 8964–8970.
 27. ОСТ 39-195-86. Нефть. Метод определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях. М., 1986. 18 с.
 28. Hu Z., Naruna M., Gao H., Nourafkan E., Wen D. Rheological properties of partially hydrolyzed polyacrylamide seeded by nanoparticles // Ind. Eng. Chem. Res. 2017. Vol. 56, No. 12. P. 3456–3463.
 29. РД-39-0148311-206-85. Руководство по проектированию и технико-экономическому анализу разработки нефтяных месторождений с применением метода полимерного воздействия на пласт. М., 1985. 209 с.
 30. Пат. SU 1747678 A1, 1992.

Поступила в редакцию 16.08.2024

Одобрена после рецензирования 06.12.2024

Принята к публикации 10.12.2024