

УДК 622.276.6

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ

Г. Г. ПЕЧЕРСКИЙ⁺, Ю. Р. КУСКИЛЬДИНА, А. В. АНТУСЁВА, М. В. КАЗАК

РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», БелНИПИнефть, ул. Книжная, 156, 246003 г. Гомель, Беларусь.

Приведены результаты лабораторных исследований по оптимизации эксплуатационных характеристик полимердисперсных систем на основе водных растворов полиакриламида FP 307 и дисперсий порошка бентонитовой глины марки ПБМВ. Установлены оптимальные концентрации химических реагентов, которые обеспечивают наибольшую эффективность применения полимердисперсных систем в геолого-физических условиях белорусских нефтяных месторождений. Приведены результаты опытно-промышленной апробации оптимизированной полимердисперсной системы.

Ключевые слова: нефтедобыча, повышение нефтеотдачи пластов, полимердисперсные системы, полиакриламид, глинопорошок, флокуляция.

Введение

Особое место в разработке методов увеличения охвата неоднородных нефтяных пластов занимает применение полимердисперсных систем (ПДС) на основе водорастворимых полимеров и дисперсных частиц горных пород. Воздействие таких систем на нефтяной пласт обеспечивает повышение фильтрационного сопротивления обводненных зон, изменение и расширение зоны охвата пласта заводнением и, как следствие, увеличение конечной нефтеотдачи [1–4].

Сущность технологии применения ПДС заключается в последовательно чередующейся закачке в нагнетательные скважины раствора полимера (чаще всего раствора полиакриламида (ПАА)) и суспензии минеральных частиц (глинистой суспензии (ГС)). В результате чего в пластовых условиях происходит образование полимердисперсных комплексов, которые блокируют водонасыщенные прослойки и каналы с низким гидродинамическим сопротивлением, тем самым способствуя вовлечению в разработку низко проницаемых участков пласта [4–6].

Механизм действия ПДС основан на флокуляции суспензии минеральных частиц, протекающей при их смешении с полимерным раствором. Гибкие макромолекулы ПАА закрепляются между частицами минерала, образуя флокулы. Скорость, с которой происходит флокуляция, зависит от фи-

зико-химических свойств суспензии и флокулирующего агента. Параметрами, определяющими протекание процесса флокуляции, являются соотношение жидкой и твердой фаз, концентрация ПАА в рабочем растворе, способ введения ПАА в суспензию (или наоборот) и условий их смешения. При высоких концентрациях ПАА в ПДС происходит стабилизация суспензии. С увеличением содержания полимера в системе структурообразование начинает распространяться за пределы флокулы – в объем суспензии. В результате этого осаждение минеральных частиц и агрегатов замедляется. При снижении концентрации ПАА происходит увеличение скорости оседания глинистых частиц [1].

Процесс образования ПДС в пластовых условиях весьма сложен, он включает стадии адсорбции полимера и частиц суспензии на поверхности пор породы, флокуляции и совместной фильтрации. ПАА одновременно является стабилизатором и флокулянт, что обеспечивает более равномерное распространение глинистых частиц в промытых зонах пласта. При движении оторочки раствора ПАА в пласте впереди ГС макромолекулы полимера адсорбируются и механически удерживаются на поверхности пористой среды, вследствие чего концентрация ПАА в растворе снижается. Частицы глины, поступающие в пласт в составе суспензии, взаимодействуют с макромоле-

⁺ Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: G.Pechersky@beloil.by.

кулами ПАА, адсорбированными на породе, что обеспечивает прочное удержание частиц в пористом пространстве. С другой стороны, взаимодействие взвешенных частиц глин с макромолекулами ПАА, находящимися в растворе, замедляет процесс их осаждения, что способствует проникновению ГС вглубь пласта и коагуляции глинистых частиц в межскважинном пространстве. В результате образуется объемная и устойчивая в потоке масса. Таким образом, полимерный раствор ПАА регулирует в пластовых условиях осаждение глинистых частиц суспензии [7–9].

При использовании в качестве флокулянтов анионных ПАА имеют значение молекулярная масса, степень гидролиза, и конформационное состояние молекул. Наиболее эффективным флокулирующим действием обладают ПАА с высокой степенью полимеризации и, соответственно, молекулярной массой. Однако молекулярная масса полимера и размеры частиц суспензии должны находиться в оптимальных соотношениях [8].

Эффективность флокуляции во многом определяется конформацией полимерных цепей в растворе, которая зависит от pH, ионного характера среды и наличия в макромолекулах ПАА ионно-генных функциональных групп. Если в системе происходит диссоциация функциональных групп, то углеводородная цепь выпрямляется и приобретает фибриллярную форму. При отсутствии электростатического отталкивания между недиссоциированными боковыми группами полимерная молекула имеет глобулярную форму. Наиболее эффективная флокуляция суспензий полимерными флокулянтами наблюдается при таком состоянии макромолекул, при котором макроионные клубки полиэлектролитов имеют наибольший объем из-за их распрямления, то есть приобретают фибриллярную форму [9].

Степень гидролиза ПАА определяет возможность его применения в качестве флокулянта. Так, ПАА, гидролизованный на 33%, имеет вытянутую молекулу вследствие электростатического отталкивания присутствующих в ней отрицательно заряженных карбоксильных групп. Высокая флокулирующая способность такого ПАА объясняется доступностью функциональных групп. ПАА, гидролизованный на 67%, имеет выраженный анионный характер. Его молекула приобретает настолько большой отрицательный заряд, что перестает адсорбироваться на отрицательно заряженных частицах ГС, несмотря на то, что она растянута еще больше, чем молекула ПАА со степенью гидролиза 33% [10].

Подводя итог сказанному можно отметить, что технология воздействия на пласт с применением ПДС имеет ряд преимуществ:

- использование малых объемов доступных и недорогих химических реагентов, которые широко применяются в других технологиях нефтедобычи;

- высокая технологичность применения в промышленных условиях (2 компонента, возможность приготовления и закачки растворов с использованием стандартного нефтепромыслового оборудования);

- возможность регулировать эксплуатационные характеристики ПДС в широких пределах в зависимости от геолого-физических условий месторождений.

Учитывая сложность извлечения нефти, залегающей в неоднородных пластах белорусских месторождений, использование системы поддержания пластового давления заводнением, существования проблемы неоднородной выработки запасов вследствие нарушения равномерности фронта вытеснения нефти водой и образования высокопроточных каналов, использование ПДС при геологотехнических мероприятиях направленных на повышение нефтеотдачи пластов вызывает обоснованный интерес.

Цель работы – установление зависимостей физико-химических свойств ПДС от концентрации входящих в их состав реагентов, от состава воды затворения и температурных условий применения.

Материалы и методы проведения исследования

В качестве дисперсной фазы использовали 1–4 мас.% водные растворы бентонитового глинопорошка марки ПБМВ (ТУ 2164-005-04002160, производитель – ЗАО «КЕРАМЗИТ», Россия). В качестве флокулянта применяли 0,001–0,1 мас.% водные растворы анионного ПАА марки FP-307 (производитель – SNF Floerger, Франция). Данные компоненты ПДС прошли лабораторные исследования и допущены к применению в геолого-физических условиях белорусских месторождений (повышенные температуры, высокая минерализация пластовых вод и др.). Их применение обеспечивает высокую технико-экономическую эффективность использования ПДС в промышленных масштабах.

Экспериментальные исследования направлены на решение следующих задач:

- оценка флокулирующих свойств ПАА FP-307 по отношению к суспензии глинопорошка марки ПБМВ;

- определение оптимальных концентраций водных растворов ПАА и ГС;

- установление зависимости флокуляционных процессов ГС от минерализации воды затворения, температуры среды;

- определение показателей физико-химических свойств ПДС.

Флокулирующие свойства ПАА изучали методом седиментационного анализа, основанного на измерении скорости накопления осадка твердых частиц на дне цилиндра, содержащего пробу ПДС. Для определения скорости оседания глинистых частиц пробу ГС совмещали (в стеклянном стакане) с равным объемом раствора ПАА, пере-

мешивали в течение 30 с, после чего смесь переносили в мерный цилиндр. Через заданные промежутки времени отмечали объем выпавшего в осадок глинопорошка в течение первых 10 мин эксперимента.

Седиментационные процессы в ПДС исследовали также в присутствии неорганических солей. С этой целью ГС смешивали с растворами ПАА, приготовленными с использованием минерализованной пластовой воды плотностью 1,05 г/см³.

Реологические и структурно-механические характеристики ПДС исследовали на многофункциональном реометре Physica MCR 301 (Anton Paar, Австрия). Достоинством данной модели является наличие ячейки, работающей под давлением, что позволяет проводить измерения в закрытой системе при заданных термобарических условиях, имитирующих пластовые условия.

Результаты исследования и их обсуждение

Показатели седиментационной устойчивости ПДС в зависимости от концентрации ПАА и глинистых частиц представлены на рис. 1.

Анализ кинетических зависимостей оседания частиц глины от концентрации ПАА ($C_{ПАА}$) показал, что при низких концентрациях полимер практически не оказывает флокулирующего действия (рис. 1, б, в, кривые 1), либо оно слабо выражено в менее концентрированной ГС (рис. 1, а, кривая 1). Максимальная скорость оседания частиц ГП с образованием минимального объема осадка соответствует некоторому интервалу значений $C_{ПАА}$ в ГС (рис. 1, а, кривые 2–4; рис. 1, б, в, кривые 2, 3). Дальнейшее увеличение $C_{ПАА}$ приводит к замедлению процесса седиментации глинистых частиц и способствует образованию полимер–глинистой

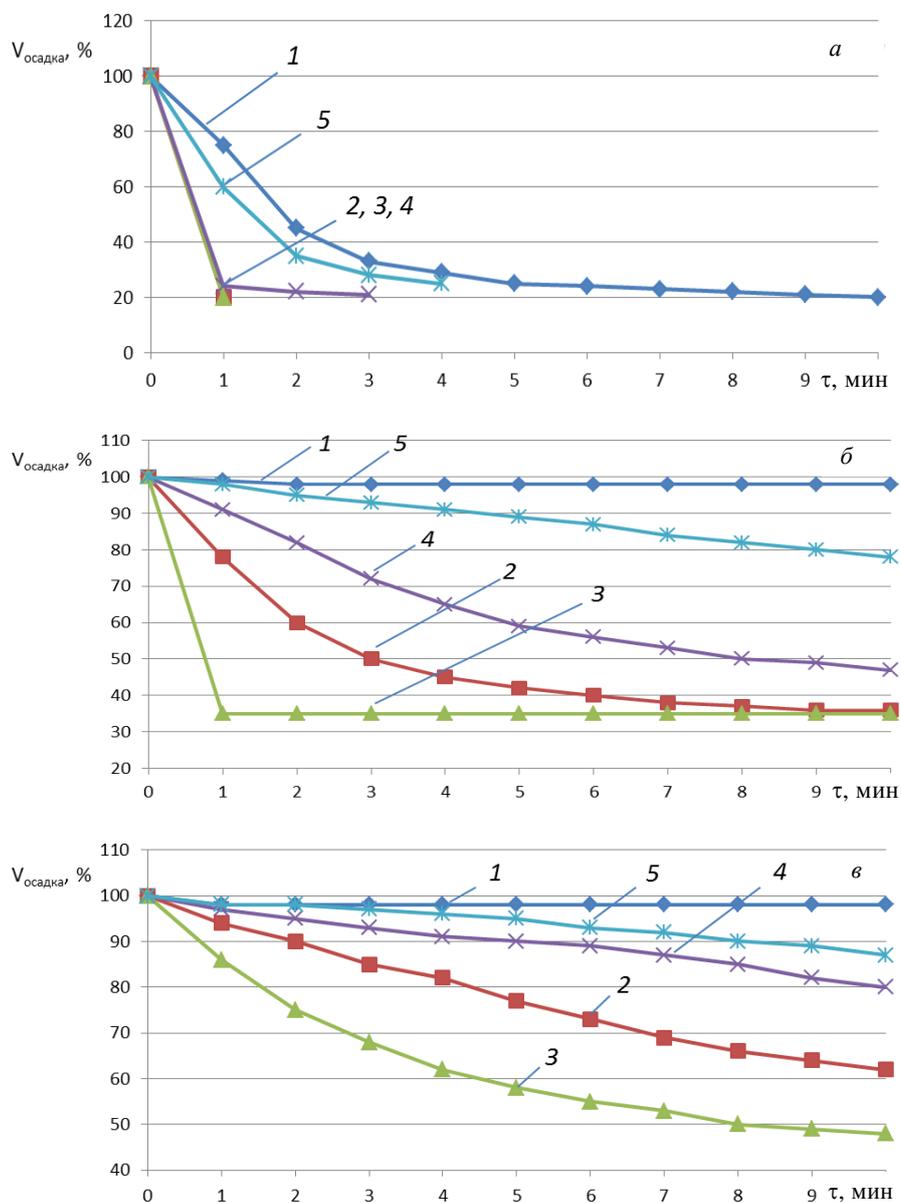


Рисунок 1 – Кинетические кривые оседания глинистых частиц при температуре 20 °С из ПДС, полученных смешением равных объемов: а – 1%; б – 2%; в – 4% ГС и растворов ПАА FP-307 концентрации, %: 1 – 0,001; 2 – 0,005; 3 – 0,01; 4 – 0,05; 5 – 0,1

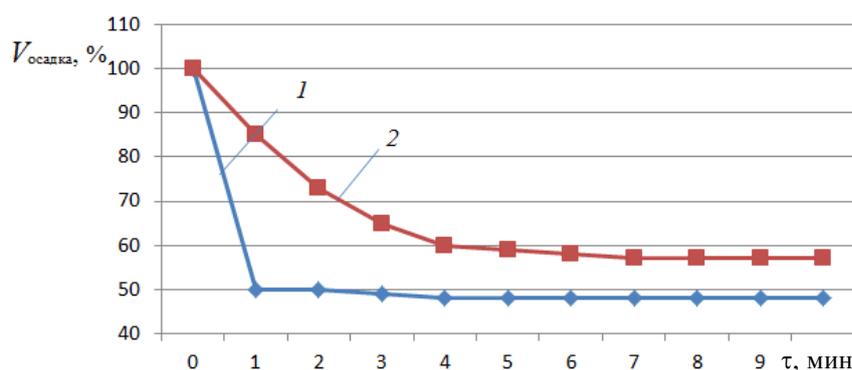


Рисунок 2 – Кинетические кривые оседания глинистых частиц при температуре 20 °С из ПДС, полученных смешением равных объемов 2% ГС и 1 – 0,05% или 2 – 0,1% растворов ПАА FR-307 в пластовой воде плотностью 1,05 г/см³

структуры практически во всем объеме пробы (рис. 1, а, кривая 5; рис. 1, б, в, кривые 4, 5).

Установлено, что наличие в системе минеральных солей (хлоридов натрия, магния и кальция, привнесенных пластовой водой), приводит к интенсификации процессов флокуляции по сравнению с пресноводными ПДС при сопоставимых концентрациях ГП и полимера (рис. 2).

Так, из сравнения рис. 1, б, кривая 4 и рис. 2, кривая 1 следует, что, при прочих равных условиях, присутствие в ПДС на основе 2% ГС и 0,05% раствора FR-307 солей пластовой воды существенно ускоряло процесс осаждения глинистых частиц. Накопление осадка в объеме 50% относительно объема пробы в пресноводной системе происходит в течение 10 мин, а в минерализованной – в течение 1 мин. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными о снижении электростатического фактора устойчивости дисперсных систем при введении в них электролитов [10–12].

Далее изучали влияние температуры на процессы флокуляции в ПДС. С этой целью готовили пробы ПДС следующим образом: растворы ПАА и ГС заданных концентраций нагревали (по отдельности) до температуры 60 °С, имитирующей пластовую. Затем их смешивали (в объемном соотношении 1:1) и переносили в цилиндры, которые помещали в термошкаф, поддерживающий указанную температуру. Снимали кинетические кривые оседания глинистых частиц из нагретых проб ПДС (рис. 3).

В результате проведенных исследований установлено, что скорость оседания глинистых частиц с повышением температуры возрастает. Так, из ПДС на основе 2% ГС и 0,05% раствора ПАА FR-307 осаждение ГП в объеме около 50% от объема пробы при комнатной температуре происходит в течение 10 мин, а при 60 °С – в течение 1 мин (рис. 1, б, кривая 4 и рис. 3, а, кривая 3). Нагревание до 60 °С ускоряет седиментационные процессы и в более концентрированных по твердой фазе ПДС. В системе на основе 4% ГС и 0,05% раствора ПАА FR 307 при комнатной температуре

осадок в объеме 80% от объема пробы формируется в течение 10 мин (рис. 1, б, кривая 4), а при температуре 60 °С – через 2 мин (рис. 3, б, кривая 3).

Анализ закономерностей протекания флокуляционных процессов в зависимости от концентрации компонентов ПДС, температуры и присутствия минеральных солей показал, что наиболее сильное флокулирующее действие на 2% и 4% ГС оказывают растворы ПАА FR-307 концентраций 0,01–0,05%. В этих случаях при смешении ГС и раствора полимера в течение короткого промежутка времени происходит формирование и осаждение рыхлых объемных осадков. Их фотографические изображения представлены на рис. 4.

Смешение ГС и раствора полимера в поровом пространстве пласта и затем формирование флокуляционных осадков ПДС является первой стадией процесса получения водоизолирующей массы. Не менее важно прогнозировать поведение полимер-минерального комплекса в динамическом режиме, его устойчивость к сдвиговым воздействиям, сопротивляемость размыванию в условиях длительной эксплуатации. Изучение закономерностей поведения ПДС в условиях установившегося течения позволяет не только выявить механизм создания фильтрационного сопротивления в поровом пространстве, но и получить дополнительную информацию о структуре ПДС в зависимости от различных факторов.

В связи с этим были исследованы зависимости эффективной вязкости ПДС, полученных в результате седиментации ГС в присутствии ПАА, от напряжения сдвига и скорости сдвига. Реологические кривые течения сфлокулированных ПДС представлены на рис. 5. Для данных кривых характерно неньютоновское течение во всем диапазоне концентраций ПАА. Для сравнения, наряду с показателями вязкости сфлокулированных осадков определяли значения вязкости компонентов ПДС 0,0025–0,05% растворов ПАА и 1% глинистой суспензии, что соответствовало концентрациям ГП и ПАА в ПДС. Вязкость данных растворов находилась в пределах 1,0–2,2 мПа·с.

Из представленных данных следует, что

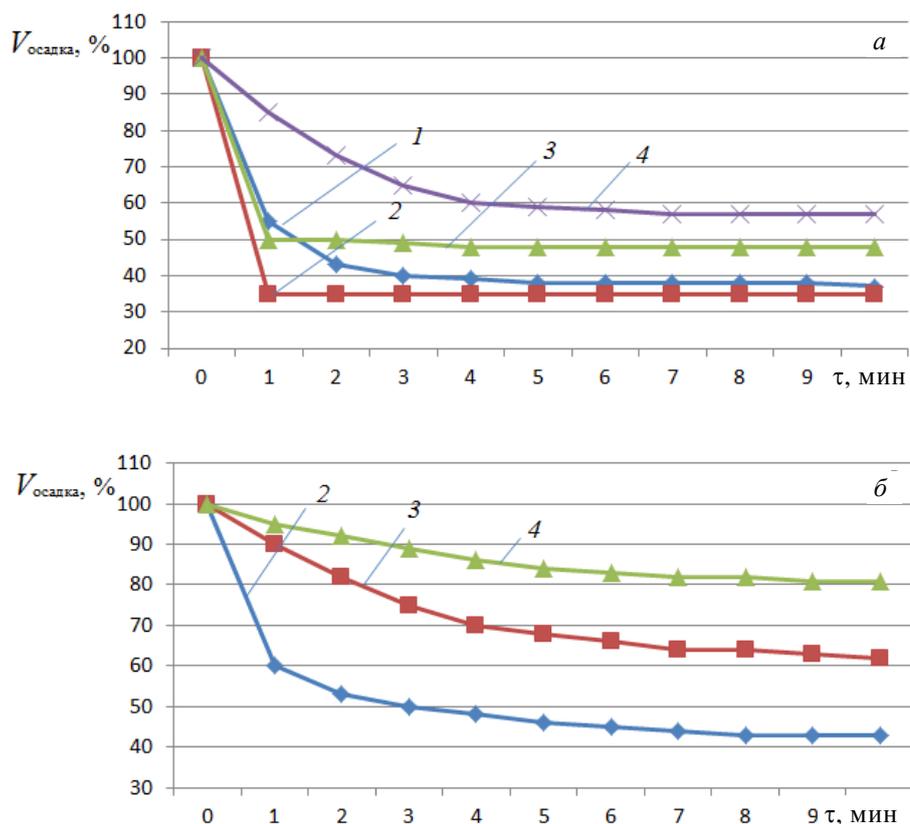


Рисунок 3 – Кинетические кривые оседания глинистых частиц при температуре 60 °С из ПДС, полученных смешением: а – 2 %; б – 4 % ГС и растворов ПАА FP-307 концентрации, %: 1 – 0,005; 2 – 0,01; 3 – 0,05; 4 – 0,1

сфлуктурированные ПДС имеют высокую вязкость по сравнению с показателями вязкости отдельно ГС и растворов ПАА. Значение вязкости проходит через максимум, соответствующий оптимуму флокуляции, то есть наиболее полному связыванию глинистых частиц с молекулами ПАА.

Так, ПДС, образующаяся при совмещении 2%

ГС и 0,01% раствора ПАА FP-307 имеет наиболее высокую скорость оседания сфлуктурированных частиц (рис. 1, б, кривая 3) и образует плотный осадок, для которого характерны высокие значения вязкости (рис. 5, кривая 2).

Анализ данных, полученных при проведении исследований, позволяет сделать следующие вы-

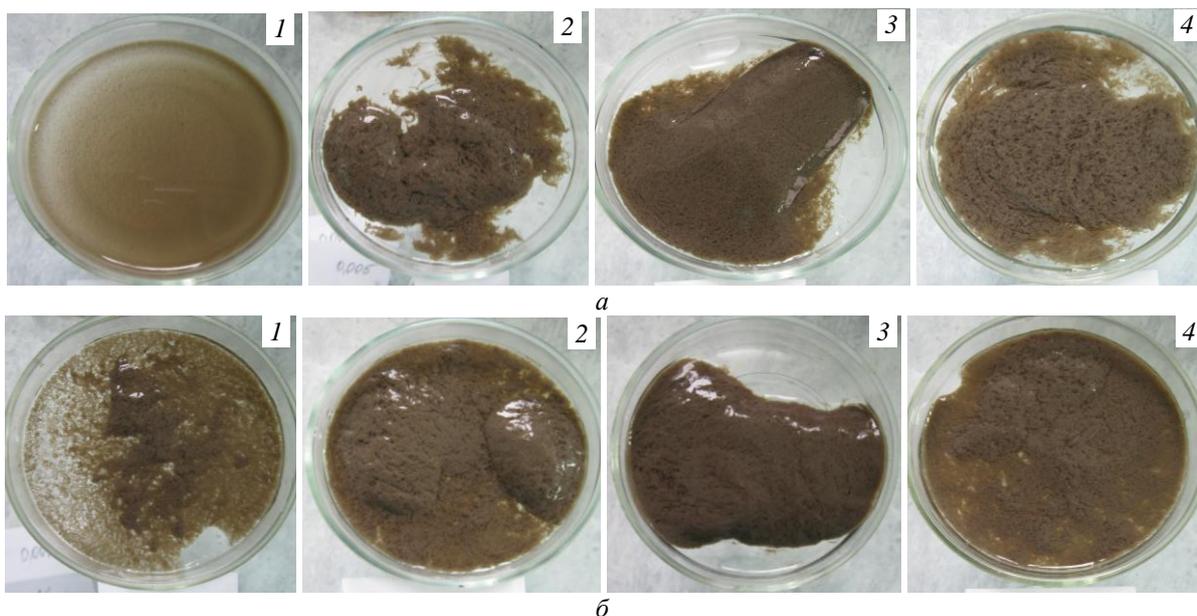


Рисунок 4 – Фотографические изображения полимердисперсных осадков, образующихся из ПДС, полученных смешением ГС концентрации, %: а – 2; б – 4 и растворов ПАА FP-307 концентрации, %: 1 – 0,005; 2 – 0,01; 3 – 0,05; 4 – 0,1. Температура 25 °С

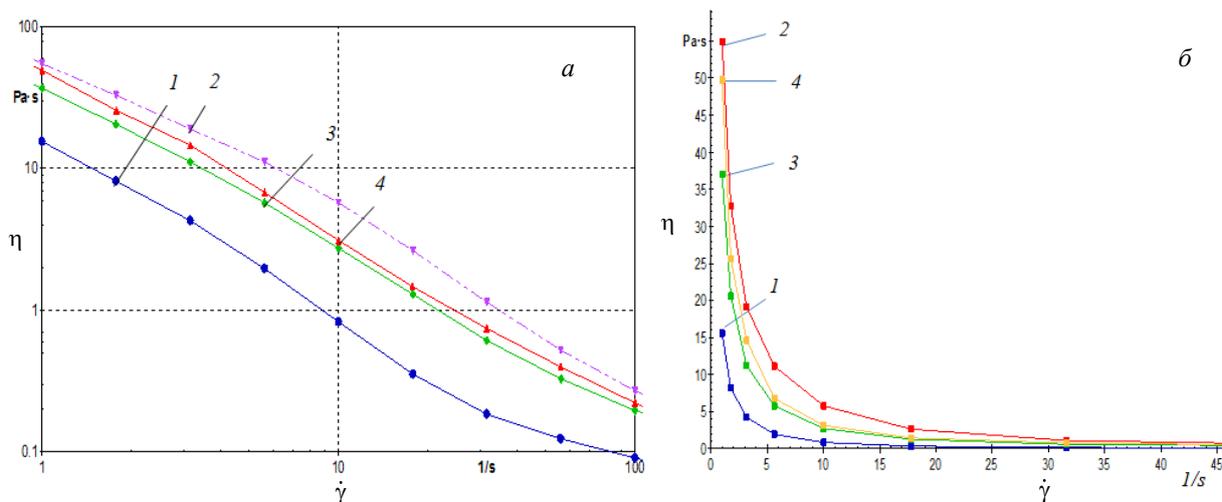


Рисунок 5 – Зависимости эффективной вязкости η от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ ПДС, полученных смешением равных объемов 2% ГС и раствора ПАА FP-307 концентрации, %: 1 – 0,005; 2 – 0,01; 3 – 0,05; 4 – 0,1; а – логарифмические координаты; б – линейные координаты

воды:

- с увеличением массового содержания глинопорошка в суспензии возрастает расход полимера для обеспечения максимальной скорости формирования ПДС;

- при повышении температуры до 60 °С скорость образования осадков ПДС возрастает и при меньшем расходе ПАА (относительно систем, испытываемых при температуре 20 °С), формируются более вязкие осадки;

- с увеличением минерализации воды расход полимера для обеспечения процесса флокуляции увеличивается.

При выборе оптимальной концентрации компонентов в ПДС учитывали, что движение полимерного раствора в пласте сопровождается адсорбцией и механическим удержанием макромолекул ПАА на поверхности каналов фильтрации, что приводит к снижению концентрации раствора. Эти потери полимера следует учитывать, используя растворы с более высокой исходной концентрацией ПАА, относительно оптимальной, для инициирования процессов флокуляции. Повышенный расход полимера целесообразен для стабилизации ПДС в призабойной зоне скважины и последующей флокуляции в удаленных от нее зонах [13].

По результатам лабораторных исследований для проведения опытно-промышленных испытаний рекомендованы следующие концентрации компонентов ПДС: ПАА – 0,05% (с учетом потерь на адсорбцию); концентрация ГС – 2%. Низкие концентрации растворов ПАА и ГС, а также невысокая стоимость данных реагентов обуславливают экономически выгодное применение ПДС во многообъемных обработках нефтяных пластов.

Испытания опытной партии ПДС на основе ПАА FP 307 и бентонитового глинопорошка марки ПБМВ в количестве 1720 м³ проведены на

семилюкской залежи Речицкого месторождения РУП «Производственное объединение «Белоруснефть». При проведении опытно-промышленных работ в высокоприемистую нагнетательную скважину 10 Речицкого месторождения компоненты ПДС закачивали порциями по 100–200 м³ через буферы 10–20 м³ пресной воды. Результаты опытно-промышленных испытаний ПДС представлены в таблице.

Результаты опытно-промышленных испытаний ПДС в геолого-техническом мероприятии по повышению нефтеотдачи пластов через скважину 10 Речицкого месторождения

Состав композиции	V _{зак} , м ³	Давление закачки, МПа	
		начальное	конечное
СПС: ПАА FP-307, ацетат хрома	2000	0	1
ПДС: ПАА FP-307, ГС	1720	1	5
СПС: ПАА FP-307, ацетат хрома	280	5	5

В результате проведенных работ получен плавный рост давления закачки от 1 до 5 МПа после закачки ПДС. Это свидетельствует о формировании в пласте потокоотклоняющего экрана и перераспределении фильтрационных потоков нагнетаемой воды.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что с увеличением массового содержания глинопорошка в суспензии возрастает расход полимера для обеспечения максимальной скорости формирования полимердисперсных систем. При повышении температуры до 60 °С скорость образования осадков полимердисперсных систем возрастает и при меньшем расходе полиакриламида (относительно систем, испытываемых при

температуре 20 °С), формируются более вязкие осадки. С увеличением минерализации воды расход полимера для обеспечения процесса флокуляции увеличивается.

Оптимальными концентрациями компонентов ПДС для применения в геолого-физических условиях белорусских нефтяных месторождений являются: ПАА – 0,05% (с учетом потерь на адсорбцию); концентрация ГС – 2%.

Литература

- Газизов, А.А. Увеличение нефтеотдачи неоднородных пластов на поздней стадии разработки / А.А. Газизов. – М.: Недра, 2002. – 639 с.
- Соркин, А.Я. Результаты применения потокорегулирующих технологий на Песчаном месторождении / А.Я. Соркин, В.Е. Ступоченко, В.А. Кан, А.Г. Дябин, М. А. Виноходов // Нефтепромысловое дело. – 2010. – № 2. – С. 27–32.
- Газизов, А.Ш. Влияние полимердисперсных систем на выработку продуктивных пластов / А.Ш. Газизов, Г.Г. Боровиков // Нефтяное хозяйство. – 1991. – № 4. – С. 21–24.
- Алтунина, Л.К. Комплексный физико-химический и микробиологический метод увеличения нефтеотдачи вязких нефтей низкотемпературных залежей Монголии / Л.К. Алтунина, Л.И. Сваровская, Т. Гэрэлмаа // Нефтехимия. – 2013. – Т. 53, № 2. – С. 101–107.
- Тазиева, Э.М. Эффективность применения ПДС на Абдрахмановской площади Ромашкинского месторождения / Э.М. Тазиева // Нефтепромысловое дело. – 1996. – № 11. – С. 8–10.
- Муслимов, Р.Х. Результаты применения новейших методов увеличения нефтеотдачи пластов на девонских залежах Ромашкинского месторождения / Р.Х. Муслимов, Э.И. Сулейманов, В.В. Землянский, Э.Т. Юлгушев // Приоритетные методы увеличения нефтеотдачи пластов и роль супертехнологий: Труды науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию открытия девонской нефти Ромашкинского месторождения (Бугульма, 25–26 ноября 1997 г.). – Казань: Новое Знание, 1998. – С. 13–26.
- Огородов, А.В. Перспективы применения метода увеличения нефтеотдачи пластов на основе закачки полимердисперсных систем в пласты Ново-Покурского месторождения / А.В. Огородов, В.С. Никитин, С.М. Ишкинов, Е.В. Данилов, Л.У. Нафикова // Нефтепромысловое дело. – 2013. – № 10. – С. 81–83.
- Хисамов, Р.С. Научно-технологические основы применения полимердисперсных систем для увеличения нефтеотдачи / Р.С. Хисамов, А.А. Газизов, А.Ш. Газизов // Нефтяное хозяйство. – 2002. – № 11. – С. 52–56.
- Ахмадеев, Р.Г. Исследование флокуляции глин полимерами / Р.Г. Ахмадеев, Н.М. Уляшева // Нефть и газ. – 1983. – № 12. – С. 23–25.
- Кудинов, В.И. Новые технологии повышения добычи нефти / В.И. Кудинов, Б.М. Сучков. – Самара: Кн. Изд-во, 1998. – 368 с.
- Дузбаев, С.К. Опыт применения модифицированных ПДС для повышения нефтеотдачи пластов, насыщенных высокоминерализованными пластовыми водами / С.К. Дузбаев, С.А. Утегалиев, А.Ш. Газизов, А.А. Газизов, А.М. Комаров // Современные проблемы разработки месторождений углеводородного сырья: тез. докладов электронной конференции Российской академии естествознания, 15–20 окт. 2005 г. // Современные наукоемкие технологии. – 2005. – № 9. – С. 93–95.
- Фролов, Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебник для ВУЗов. – 2-изд., перераб. и доп. / Ю.Г. Фролов. – М.: Химия, 1988. – 464 с.
- Хисамов, Р.С. Увеличение охвата продуктивных пластов воздействием / Р.С. Хисамов, А.А. Газизов, А.Ш. Газизов. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2003. – 568 с.

Pechersky G. G., Kuskildina Y. R., Antuseva A. V., and Kazak M. V.

Optimization of operational characteristics of polymer-dispersed systems aimed at increasing oil production of petroleum strata.

The article presents results of laboratory research on optimization of operational characteristics of polymer-dispersed systems based on aqueous solutions of polyacrylamide FP 307 and bentonite brand PBMB. Optimal concentrations of chemical reagents which provide the highest efficiency of application polymer-dispersed systems in geologic-physical conditions of the Belarus oil-fields defined. Results of experimental-field operations optimized polymer-dispersed systems.

Keywords: oil production, the enhanced oil recovery, polymer-dispersed system, polyacrylamide, the bentonite powder, flocculation.

Поступила в редакцию 21.10.2015.

© Г. Г. Печерский, Ю. Р. Кускильдина, А. В. Антусёва, М. В. Казак, 2015.