

УДК 622.276.4

Экспериментальное исследование пеногелей для регулирования фильтрационных потоков флюидов в нефтегазоконденсатных пластах

Л. К. АЛТУНИНА, В. А. КУВШИНОВ, И. В. КУВШИНОВ

*Институт химии нефти Сибирского отделения РАН,
проспект Академический, 4, Томск 634021 (Россия)**E-mail: canc@ipc.tsc.ru*

(Поступила 05.11.13; после доработки 14.03.14)

Аннотация

Исследованы композиции на основе поверхностно-активных веществ и неорганических реагентов, способные генерировать непосредственно в нефтяном пласте устойчивые пеногели. Определены оптимальные диапазоны концентраций компонентов пеногелеобразующих композиций, обеспечивающие увеличение нефтеотдачи и охват нефтяных и газоконденсатных залежей активными системами разработки с применением заводнения, закачки газа или водяного пара.

Ключевые слова: нефть, газ, конденсат, месторождение, ПАВ, пенгель, повышение нефтеотдачи, ограничения газопритока

ВВЕДЕНИЕ

Имеющиеся на сегодняшний день технологии добычи нефти и газоконденсата таковы, что в неоднородных, сложно построенных коллекторах в основном вырабатываются высокопроницаемые пласты, а низкопроницаемые пласты (пропластки) либо совсем не вовлекаются в разработку, либо вовлекаются лишь частично. Увеличение добычи из неоднородных залежей за счет разработки низкопроницаемых пластов становится все более актуальной задачей, так как крупнейшие месторождения вступают в позднюю стадию разработки и доля трудноизвлекаемых запасов нефти неуклонно растет. В связи с этим необходимы новые методы регулирования, изменения структуры фильтрационных потоков пластовых флюидов, которые позволят увеличить охват пласта, подключить к разработке низкопроницаемые зоны пласта, исклю-

чить или уменьшить конусообразование и прорывы воды и газа (из газовой шапки либо подошвенной воды). Подвижность пластовых флюидов регулируется с помощью пенных систем [1–5]. Один из перспективных способов решения данной проблемы – использование гелеобразующих и пеногелеобразующих систем.

Технология с использованием пеногеля состоит из следующих этапов. В пласт закачивается гомогенный водный раствор, содержащий поверхностно-активное вещество (ПАВ) и неорганическую гелеобразующую систему на основе карбамида и соли алюминия. Продвижение раствора в пласт осуществляется азотом, диоксидом углерода или углеводородным газом. Вследствие больших различий в вязкости газа и пенообразующего раствора при продвижении (вытеснении) раствора в пористой среде пласта газ диспергируется по механизму капиллярно-гидродинамической не-

устойчивости с образованием газовой эмульсии или пены [1]. Газ можно закачивать раздельно или совместно с раствором, компрессором или эжектором по схеме водогазового воздействия или схемы WAG. Возможны варианты технологии без закачки газа, например, когда вспенивание производится газом, выделяющимся из нефти при снижении пластового давления ниже давления насыщения, либо углекислым газом, образующимся в результате гидролиза карбамида.

В пласте за счет его тепловой энергии или энергии закачиваемого теплоносителя карбамид постепенно гидролизуется с выделением углекислого газа, вследствие чего реализуется дополнительное, а в некоторых вариантах и основное пенообразование. Увеличение щелочности среды за счет гидролиза карбамида приводит к гидролитической поликонденсации мономерных ионов алюминия и образованию геля гидроксида алюминия. Образовавшаяся в пленках пены сетчатая структура студнеобразного геля гидроксида алюминия препятствует истечению раствора из пены, оболочки пенных пузырьков загустевают, повышается структурно-механическая прочность пены. Благодаря стабилизации оболочек пенных пузырьков коллоидным гидроксидом алюминия получаются устойчивые в присутствии нефти загущенные пены и пеногели. Время гелеобразования зависит от температуры и соотношения компонентов. По сравнению с другими технологиями генерация пеногеля непосредственно в пласте сокращает расход товарных реагентов на создание в пласте отклоняющих экранов и регулирование фильтрационных газожидкостных потоков.

В данной работе рассмотрены результаты экспериментального исследования систем на основе ПАВ и неорганических реагентов, образующих в пласте пеногели при высоких пластовых температурах или тепловом воздействии. Пеногели позволяют реализовать физико-химический метод регулирования фильтрационных потоков в продуктивных пластах нефтяных и газоконденсатных месторождений с целью увеличения охвата пласта заводнением, повышения нефтеотдачи и ограничения газопотока.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве основной гелеобразующей композиции для исследований выбрана разработанная в ИХН СО РАН неорганическая термотропная гелеобразующая композиция ГАЛКА®. Она представляет собой систему соль алюминия – карбамид – вода, из которой при высокой температуре образуется гель [6]. Для исследования пенообразующей способности и устойчивости пен из пеногелеобразующих композиций приготовлены растворы с различным соотношением неионогенного ПАВ (НПАВ) и анионоактивного ПАВ (АПАВ) или катионоактивного ПАВ (КПАВ) и компонентов гелеобразующей системы (хлорид алюминия и карбамид). Использовали промышленно выпускаемые ПАВ: в качестве НПАВ – неол АФ 9-12, оксиэтилированный изононилфенол на основе тримеров пропилена со степенью оксиэтилирования, равной 12; в качестве АПАВ – сульфонол, алкиларилсульфонат натрия с длиной цепи алкильного радикала $C_{11}-C_{18}$; в качестве КПАВ – цетилтриметиламмоний бромид. Растворы приготовлены на основе воды различной минерализации – дистиллированной и модели сеноманской воды состава, мас. %: NaCl 1.370, CaCl₂ 0.130, MgCl₂ 0.039, KHCO₃ 0.027; pH 7.7, плотность 1009 кг/м³. Эксперименты проводили при температурах 20, 30, 50, 70 и 90 °С.

Исследовали влияние концентрации и соотношения неионогенных и анионоактивных ПАВ на пенообразующую способность и устойчивость пен, кинетику процессов гелеобразования в системах, образующих пеногели при высокой пластовой температуре, физико-химические и реологические свойства, фильтрационные характеристики и нефтевытесняющую способность пеногелеобразующих композиций и пеногелей. Проведен выбор оптимальных составов применительно к условиям месторождений Западной Сибири с высокой пластовой температурой (70–120 °С) и высоким газовым фактором – от 80 м³/м³ для нефтяных и до 1100 м³/м³ для газоконденсатных залежей.

Плотность растворов определяли пикнометрическим методом, вязкость – методом вибрационной вискозиметрии с использовани-

ем вибрационного вискозиметра “Реокинетика” с камертонным датчиком.

Эксперименты по фильтрации газа через монолитные цилиндрические образцы из спеченного молотого стекла и природного кернового материала проводили при комнатной температуре на модифицированной установке для определения газопроницаемости кернов типа ГК-05, входящей в комплект аппаратуры АКМ-“Керн”. Размеры образцов: длина 30–32 мм, диаметр 28 мм, объем 18–19 см³, $V_{\text{пор}} = 3\text{--}4\text{ см}^3$. Газопроницаемость образцов из спеченного стекла равна 10 мкм². Установка позволяла инжектировать порции композиций в поток газа, фильтрующегося через образец. В процессе фильтрации газа с постоянным расходом непрерывно автоматически регистрировали перепад давления на образце.

Эксперименты по образованию пеногелей в пористой среде проводили при противодействии давлению 6 атм и температуре 130 °С в установке для исследования нефтевытеснения с металлическими колонками длиной 30 см и внутренним диаметром 2,0 см, заполненных силикагелем АСКГ. Газопроницаемость колонок 10–20 мкм², $V_{\text{пор}} = 66\text{ см}^3$. Колонки под вакуумом заполняли пластовой водой, которую замещали нефтью до прекращения вытеснения воды. Колонки помещали в термощкаф и опрессовывали при давлении 6–10 атм в течение нескольких часов при комнатной температуре, затем термостатировали при температуре 80 °С на протяжении нескольких часов. После этого пластовой водой вытесняли нефть до полной обводненности продукции, т. е. до прекращения вытеснения нефти, и закачивали по 30 см³ пеногелеобразующей композиции в каждую колонку. Далее прокачивали через каждую колонку еще по 15 см³ пластовой воды для удаления композиции из подводящих трубок; вход колонок перекрывали и термостатировали при 130 °С при противодействии давлению 6 атм в течение времени, достаточного для пеногелеобразования. При этом в мернике на выходе из колонки оставляли некоторое количество воды с целью визуального наблюдения за процессом газообразования.

Нефтевытесняющие свойства пеногелеобразующих композиций исследовали с использованием фильтрационной установки УИПК-1М в условиях, моделирующих пластовые,

при пластовой температуре 90 °С. Эффективность применения композиций изучали в процессе доотмыва остаточной нефти и при первичном вытеснении нефти. Кроме того, проводили вытеснение нефти из двух параллельных колонок с различной проницаемостью. Оценку нефтевытесняющей способности пеногелеобразующих составов из природного кернового материала проводили в условиях доотмыва нефти и первичного вытеснения на неоднородных моделях пласта, состоящих из двух параллельных колонок с общим входом и отдельным выходом, с проницаемостью в пределах от 0,064 до 0,880 мкм². Проницаемость колонок различалась в 2,5–6 раз.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрации и соотношения ПАВ

Обнаружено, что при всех температурах кратность и устойчивость пен возрастают с повышением абсолютных концентраций ПАВ более 0,5 мас. % и доли анионактивного ПАВ в смеси с неионогенным ПАВ. Кратность пен находилась в пределах 4–9 (среднее значение равно 8), а устойчивость пен – в пределах 36–165 с/см³ (среднее – 63 с/см³). Максимальной устойчивостью обладают пены, генерированные из композиций с анионактивным ПАВ. Это обусловлено его способностью образовывать ассоциаты с ионами алюминия в пенной пленке и тем самым повышать устойчивость пены. Образование ассоциатов подавляется в присутствии неионогенного ПАВ, которое образует смешанные мицеллы с анион-

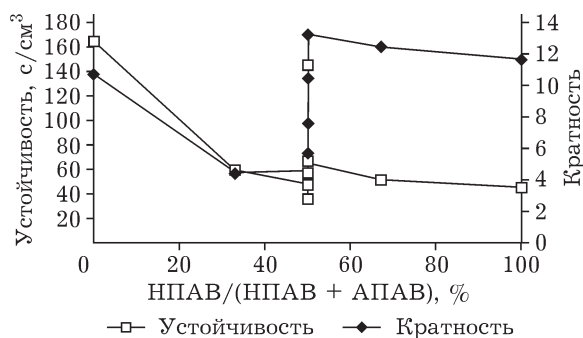


Рис. 1. Влияние соотношения неионогенного и анионактивного ПАВ в пеногелеобразующих растворах на кратность и устойчивость пены при температуре 70 °С.

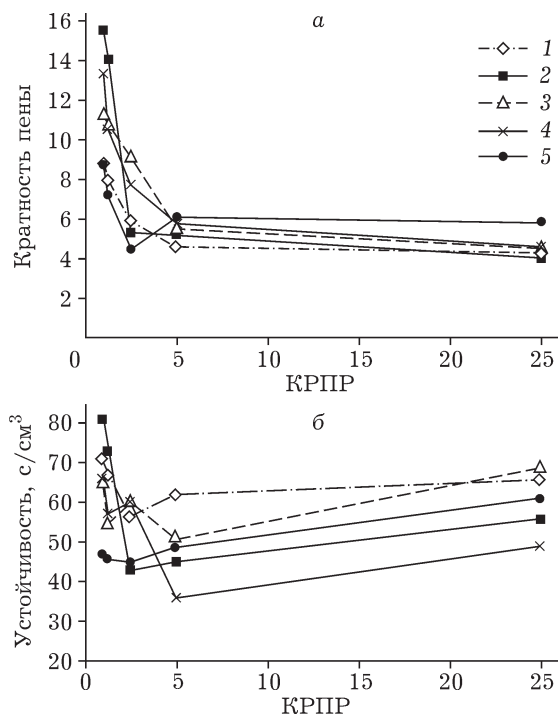


Рис. 2. Зависимости кратности (а) и устойчивости (б) пены от кратности разбавления пеногелеобразующего раствора (КРПР) при различной температуре, °С: 20 (1), 30 (2), 50 (3), 70 (4), 90 (5).

активным ПАВ. На различие механизмов стабилизации пен анионактивным и неионогенным ПАВ указывает резкое изменение устойчивости и кратности пен в зависимости от соотношения НПАВ и АПАВ в растворе (рис. 1).

Установлено, что для всех температур интервал оптимальных концентраций ПАВ составляет 1–2,5 мас. % при соотношениях АПАВ/НПАВ, равных 2 : 0, 2 : 1, 1 : 2, 1 : 1.

Соотношение ПАВ слабо влияет на время гелеобразования. Влияние температуры на время гелеобразования подчиняется правилу Вант-Гоффа: при повышении температуры на каждые 10 °С время гелеобразования уменьшается в 3–3,5 раза.

Плотность пен находится в интервале 0,09–0,18 г/см³, плотность пеногелей – 0,04–0,09 г/см³, что соответствует значениям кратности пены и пеногелей, равным 6–11 и 11–25 соответственно. Вязкости пен, полученных из пеногелеобразующих растворов разного состава, близки по величине и колеблются в пределах 31–76 мПа · с, причем наибольшую вязкость имеет пена, образованная из раствора с соот-

ношением неолола АФ 9-12 и сульфанола 1 : 1. Значения вязкости гелей и пеногелей по величине близки между собой. Наименьшая вязкость характерна для пеногеля, исходный раствор для которого содержал только неолол АФ 9-12. Вязкость пеногелей, которые получены из растворов с содержанием неолола АФ 9-12 и АПАВ или КПАВ в соотношениях 1 : 1, 2 : 1 и 0 : 2, близки и колеблется в пределах 750–3400 мПа · с.

Проведены опыты с целью установить влияние разбавления сеноманской водой исходного пеногелеобразующего раствора на кратность и устойчивость пены при различной температуре (рис. 2). Пеногелеобразующий раствор содержит 4,1 % безводного хлорида алюминия, 15 % карбамида, 2,5 % неолола АФ 9-12, 2,5 % сульфанола и 75,9 % сеноманской воды. Обнаружено, что при разбавлении в 5 раз кратность пены уменьшается до 4 и при дальнейшем разбавлении уже не изменяется. Устойчивость пены демонстрирует аналогичную зависимость от разбавления.

Пеногелеобразование при фильтрации газа через пористую среду

Проведены экспериментальные исследования по фильтрации газа через монолитные цилиндрические образцы из спеченного молотого стекла и природного кернового материала (рис. 3, 4).

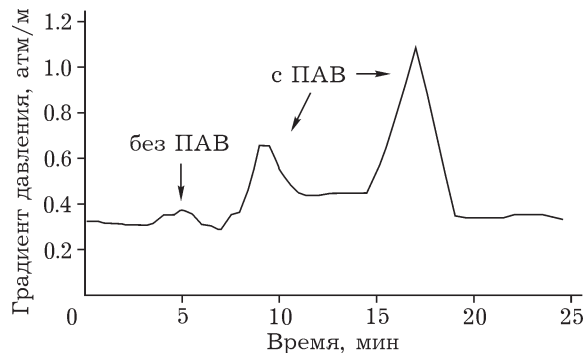


Рис. 3. Изменение перепада давления на образце в процессе непрерывной фильтрации газа с постоянным расходом и периодической инжекцией в образец раствора гелеобразующей (без ПАВ) и пеногелеобразующей (с ПАВ) системы.

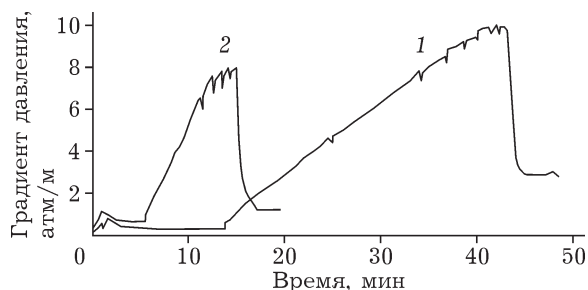


Рис. 4. Градиент давления на образце в процессе фильтрации газа с постоянным расходом и периодической инъекцией порций пеногелеобразующей композиции. Расход газа, $\text{см}^3/\text{мин}$: 1.5 (1), 3.5 (2).

На рис. 3 показан характер изменения перепада давления на образце в процессе непрерывной фильтрации газа с постоянным расходом и периодической инъекцией в образец сначала порций раствора гелеобразующей системы без ПАВ-пенообразователей, а потом раствора пеногелеобразующей системы. Объем порции составлял 1 см^3 , время инъекции порции не превышало 1 с. Как видно, начальный участок (до первой инъекции) соответствует фильтрации газа через воздушно-сухой образец. После второй инъекции раствор гелеобразующей системы полностью заполнил поровое пространство образца. В результате уменьшилась фазовая проницаемость по газу, что выразилось в заметном увеличении перепада давления. Небольшой максимум на кривой свидетельствует о прорыве газа, после чего перепад давления стабилизируется и последующие инъекции гелеобразующего раствора уже не влияют на его величину.

При переходе к инъекции порций раствора пеногелеобразующей композиции картина фильтрации газа резко меняется. Так, после инъекции каждой последующей порции этого раствора наблюдается продолжительный несимметричный пик давления, свидетельствующий об образовании долгоживущей пенной оторочки в образце. Следовательно, при инъектировании в поток газа небольших оторочек воды или гелеобразующего раствора без пенообразователя перепад давления, обусловленный фильтрационным газодвижимым потоком, намного ниже достигаемого при инъекции пеногелеобразующего раствора.

Изучение генерации пены в пористой среде в интервале расхода газа $0.1\text{--}4 \text{ см}^3/\text{мин}$ выявило следующие закономерности. Уже при незначительном расходе газа ($0.1 \text{ см}^3/\text{мин}$) образуется пена. Максимум фильтрационного сопротивления пены потоку газа не зависит от расхода газа, если расход составляет менее $1 \text{ см}^3/\text{мин}$. Поддержка определенного содержания пены в образце за счет непрерывной или периодической закачки композиции позволяет добиться значительного, вплоть до пятикратного, возрастания фильтрационного сопротивления для газа на данном образце керна.

На рис. 4 показаны зависимости градиента давления в образце при фильтрации газа с постоянным расходом и периодической инъекцией порций пеногелеобразующей композиции. Инъекцию очередной порции производили в момент достижения максимального перепада давления, обусловленного предыдущей порцией. Приведены зависимости, полученные для двух значений расхода газа — 1.5 и $3.5 \text{ см}^3/\text{мин}$. Первые несколько порций композиции не вызывают заметной генерации пены, что говорит о недостаточном содержании пенообразователя в объеме композиции вследствие адсорбции пенообразователя на поверхности поровых каналов. Генерация пены начинается только после инъекции 2–3 порций композиции, когда достигается адсорбционное насыщение пенообразователем поверхности пор образца.

Схожие закономерности наблюдаются при использовании пеногелеобразующих композиций, содержащих катионное ПАВ вместо анионного.

Пеногелеобразование для выравнивания профиля приемистости

При экспериментальном исследовании образования пеногелей в пористой среде в ходе термостатирования при температуре $130 \text{ }^\circ\text{C}$ установлено, что с определенного момента наблюдается барботирование газа через воду в мернике, возрастает уровень жидкости, а пробы жидкости из мерника имеют щелочную реакцию среды. Это свидетельствует о гидролизе карбамида с образованием аммиака и диоксида углерода.

В начале опыта фильтрация пластовой воды с расходом $4 \text{ см}^3/\text{мин}$ осуществляется при очень малом перепаде давления, который не удается зарегистрировать входящими в состав установки манометрами с ценой деления шкалы 1 атм. Через 2 сут для колонки с композицией, содержащей цетилтриметиаммоний бромид и неол АФ 9-12, наблюдалось значительное фильтрационное сопротивление, максимальный перепад давления на колонке достигал 30 атм, но выделение газа при этом не прекращалось. Это свидетельствует о внутрислоевой генерации пеногеля. По достижении максимального перепада давления происходил прорыв воды через пенгель, что обнаруживалось по резкому снижению перепада, практически до нуля.

Нефтевытесняющие свойства пеногелеобразующих композиций

При исследовании нефтевытесняющей способности пеногелеобразующих составов в условиях доотмыва остаточной нефти из неоднородной модели пласта установлено, что она входит преимущественно в высокопроницаемую колонку (в соотношении 15 : 1). В результате подвижность воды при фильтрации через эту колонку снижается в 4.8 раза, фильтрационные потоки перераспределяются, остаточная нефть вытесняется из низкопроницаемой колонки. Как следствие, коэффициент вытеснения нефти по низкопроницаемой колонке вырос с 22.4 до 62.9 %, а в целом по неоднородной модели пласта – с 51 до 68.2 %, т. е. на 17.2 %.

В опыте по первичному вытеснению нефти соотношение объемов закачки состава в колонки с различной проницаемостью составляло 2.8 : 1. Это способствовало выравниванию профиля приемистости модели: объемы воды, закачанной после пеногелеобразующей композиции, находились в соотношении 1.25 : 1. В результате достигнуты высокие коэффициенты вытеснения: 71.2 % по низкопроницаемой колонке и 79.9 % по высокопроницаемой колонке, а в целом по модели – 75.1 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы физико-химические, реологические и нефтевытесняющие свойства пеногелеобразующих композиций на основе системы соль алюминия – карбамид – ПАВ – вода. Определены оптимальные диапазоны концентраций компонентов пеногелеобразующих композиций, предназначенных для увеличения охвата неоднородного пласта заводнением, выравнивания профиля приемистости и увеличения нефтеотдачи неоднородных пластов. Интервал оптимальных концентраций ПАВ общий для всех температур и составляет 1–2.5 мас. % при соотношениях АПАВ/НПАВ, равных 2 : 0, 2 : 1, 1 : 2, 1 : 1. Разбавление исходного пеногелеобразующего раствора сеноманской водой в 5 раз вызывает уменьшение кратности пены до значения 4, которое уже не изменяется при дальнейшем разбавлении.

Пеногели перспективны для использования на месторождениях Западной Сибири, которые отличаются высокой пластовой температурой (70–120 °С) и высокой неоднородностью. Физико-химический метод с использованием пеногелей позволяет повысить коэффициент извлечения нефти на 8–10 пунктов, снизить накопленный конечный водонефтяной фактор как минимум в 1.3 раза в условиях, когда проницаемость высоко- и низкопроницаемых коллекторов различается в пять раз и более.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт № 14.515.11.0095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Корнев К. Г. Пены в пористых средах. М.: Физматлит, 2001. 192 с.
- 2 Кругляков П. М., Ексерова Д. Р. Пена и пенные пленки. М.: Химия, 1990. 432 с.
- 3 Schramm L. L. Emulsions, Foams, and Suspensions. Fundamentals and Applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2005. 448 p.
- 4 Foams – Theory, Measurements, and Applications / Ed. by R. K. Prud'homme, S. A. Khan. NY: M. Dekker, 1996. 596 p.
- 5 Амиян В. А., Амиян А. В., Казакевич Л. В., Бекиш Е. Н. Применение пенных систем в нефтегазодобыче. М.: Недра, 1987. 229 с.
- 6 Алтунина Л. К., Кувшинов В. А. // Успехи химии. 2007. Т. 76 (10). С. 1034–1051.