ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ И МИКРОРЕОЛОГИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ В ПОЛИМЕРНЫХ БУРОВЫХ РАСТВОРАХ

О. Ф. Кондрашев

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия

Аннотация. Показано, что биополимерные буровые растворы без твердой фазы приобретают в пористой среде вязкоупругие свойства, которые не фиксируются средствами стандартной буровой реометрии. Фильтрационными и микрореологическими (в масштабе поры) исследованиями установлено, что глубина проникновения фильтрата и экранирование призабойной зоны в этом случае определяются степенью структурно-механической кольматации, возникающей вследствие контактного взаимодействия жидкости и породы.

Ключевые слова: микрореология; фильтрация; контактное взаимодействие; структурообразование; структурно-механическая кольматация; разрыв сплошности

FILTRATION AND MICRO-RHEOLOGICAL ANOMALIES OF POLYMER DRILLING SOLUTIONS

O. F. Kondrashev

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Abstract. The article pays attention to the fact that biopolymer drilling solutions without a solid phase acquire viscoelastic properties in a porous medium that are not fixed by means of standard drilling rheometry. Filtration and micro-rheological (pore scale) studies have established that the depth of penetration of the filtrate and the screening of the bottomhole zone in this case are determined by the degree of structural-mechanical colmatation resulting from the contact interaction of the liquid and rock null.

Key words: microrheology; filtration; contact interaction; structuring; structural-mechanical colmatation; discontinuity null structural and mechanical colmatation resulting from the contact interaction of the liquid and rock null

Необходимость в дополнительных, помимо средств стандартной буровой реометрии (РД 39-2-645-81), исследованиях возникла при разработке полимерных буровых растворов без твердой фазы для Западной Сибири [1], поскольку их антифильтрационные или изолирующие свойства, обеспечивающие экранирование зоны бурения от продуктивного пласта, не отвечали сложным геологотехническим условиям бурения.

Известно, что в растворах с твердой фазой эту функцию выполняет глинистая корка на стенках скважины. В нашем случае при отсутствии твердой фазы полимерная пленка может обеспечивать приемлемую изоляцию продуктивного пласталишь в ряде случаев — при несоизмеримости размеров макромолекул и пор, при невысоких пластовых температурах, то есть в условиях, нехарактерных для эксплуатации.

По этой причине для усиления изолирующих качеств новых буровых систем было решено задействовать структурно-механическуюкольматацию, возникающую при контактном взаимодействии фильтрата с породой. Теоретическим обоснованием этой идеи послужили известные работы Π . А. Ребиндера и др. по затуханию фильтрации, которое связывалось с образованием адсорбционно-сольватных

или граничных слоев на стенках пор и снижением по этой причине эффективного сечения поровых каналов и проницаемости керна в целом. Дальнейшие исследования граничных слоев показали, что они представляют собой двумерные образования, соизмеримые с размерами пор и аномальными физическими свойствами — повышенной вязкостью и сдвиговой упругостью, которые, как правило, не проявляются у жидкости в обычных, объемных условиях [2–4].

С этих позиций становится понятным, почему стандартная буровая реометрия, адаптированная к более простым в реологическом отношении вязкопластичным глинистым растворам и не ориентированная на анализ контактного взаимодействия жидкости с твердым телом, не обнаруживает подобные эффекты и не может служить инструментом для их изучения.

В связи с этим и были проведены специальные фильтрационные и микрореологические (в масштабе поры) эксперименты на естественных образцах и моделях породы.

Фильтрационные исследования буровых растворов (стабилизирующая основа — КМІІ, Celpol SL) выполнялись на автоматизированной установке FDES-645 (Cortest, США) [1, 2]. Подготовка образцов пористой среды (керны Кирско-Коттынского месторождения проницаемостью 0,0024 мкм2, пористостью 14,067 % для фильтрата биополимерного раствора на основе Celpol SL и проницаемостью 0,0213 мкм², пористостью 18,05 % для фильтрата глинистого раствора с КМЦ) и дальнейшие фильтрационные исследования проводились по отраслевым стандартам в режиме постоянного расхода.

Микрореологические измерения были проведены по авторской методике [3] для получения информации о физическом состоянии жидкости в порах микронного размера: толщине граничных слоев, формирующихся на границе раздела жидкость — порода; ее структурно-механических характеристиках и критических значениях напряжения сдвига, переводящих жидкость в подвижное состояние в порах, характерных для продуктивных пластов. Данные такого рода дают возможность выявить факторы, определяющие интенсивность межфазного взаимодействия и степень модификации характеристик пластовой системы фильтрат бурового раствора — порода, более адекватно интерпретировать итоги фильтрационных испытаний.

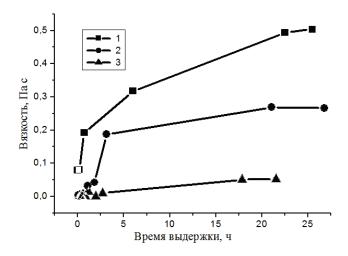


Рис. 1. Динамика вязкости в узких зазорах 5 (1), 10 (2) и 20 (3) мкм для фильтрата раствора на основе КМЦ

Измерительная ячейка экспериментальной установки (в дальнейшем — узкий зазор), реализующая динамический вариант известного прибора Вейлера — Ребиндера, представляет собой плоский капилляр — две кварцевые пластины, закрепленные на упругом подвесе. Резонансные колебания верхней подвижной пластины дают информацию о вязких или упругих свойствах жидкости, контактирующей с породообразующим минералом. Оригинальная механическая подвеска обеспечивает тангенциальность крепления пластин узкого зазора, изменение его величины в пределах 0,3...30 мкм, проведение измерений структурно-механических показателей жидкости при пластовых скоростях и напряжениях сдвига, температурах и лавлениях.

Комплексные макро- и микроскопические исследования позволили выявить основные закономерности структурно-механической кольматации в разрабатываемых системах и использовать их для улучшения эксплуатационных характеристик растворов.

Полученные кривые структурообразования в узких зазорах разной величины (рис. 1) наглядно отражают влияние поверхностных сил, действующих на границе фильтрат раствора — порода, на состояние жидкости; видно, что в разных силовых полях различие по вязкости весьма значительно. Подобная несоизмеримость установлена и при сопоставлении объемной и модифицированной вязкостей.

Естественно, столь радикальная модификация фильтрата должна отражаться на характеристиках пластовой системы, изменяя ее фильтрационно-емкостные свойства за счет образования граничных слоев и глубины проникновения фильтрата в пласт. Из приведенных данных следует вывод о соизмеримости размеров поровых каналов и пристенных граничных слоев; отмеченное кратное увеличение вязкости является следствием перекрытия ими порового объема.

Синхронное изменение данных двух независимых методов напрямую указывает на молекулярно-поверхностную природу затухания фильтрации (рис. 2 и 3), а учитывая факт прямых микрореологических измерений в зазоре, соответствующем среднему радиусу пор исследуемых кернов, можно утверждать, что именно модификация состояния фильтрата при контактном взаимодействии (кривые 2 и 3 рассматриваемых рисунков) приводит к структурно-механической кольматации поровых каналов и соответствующему изменению макроскопических фильтрационных показателей.

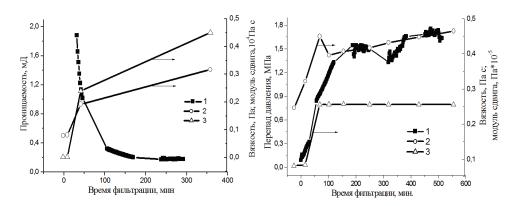


Рис. 2. Зависимость проницаемости (1) от времени фильтрации, вязкости (2) и модуля сдвига (3) для фильтрата раствора на основе КМЦ в узком зазоре 5 мкм

Рис. 3. Зависимость перепада давления (1), вязкости (2) и модуля сдвига (3) от времени для раствора на основе Celpol SL в узком зазоре 5 мкм

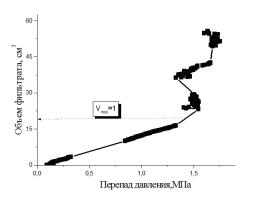
Динамика структурно-механических параметров в узких зазорах, представленная на данных иллюстрациях (кривые 2 и 3), говорит о нескольких фазах этого явления. На первой и самой быстрой, протекающей в первые минуты контакта, происходят адсорбция макромолекул фильтрата на свободных площадках или замещение поверхностно-активных молекул пластовых флюидов с образованием пристенных граничных слоев. Кратное увеличение динамической вязкости на этом этапе в зазоре 5 мкм указывает на то, что дальнодействие твердой фазы распространяется далеко за пределы граничных слоев фильтрата.

Отмеченное характерно для адсорбции высокомолекулярных веществ на границе с твердым телом [5]. На начальной стадии этот процесс может развиваться одновременно во всем объеме. Макромолекулы при этом могут входить в несколько зон структурообразования, формируя сетку, препятствующую дальнейшему массопереносу. По этой причине перемещение макромолекул носит преимущественно сегментальный характер.

Кроме того, в отличие от низкомолекулярных соединений активные группы или сегменты макромолекул никогда полностью не связываются с адсорбентом: часть сегментов закрепляется на поверхности, остальные простираются в объем в виде петель или свободных концов. Вследствие этого на границе раздела фаз создаются предпосылки для создания поверхностного слоя полимера, локальная концентрация в котором отличается от среднего значения по объему. Этому способствуют и селективный характер адсорбции полимеров, являющихся по своей природе полимергомологами, а также особенности адсорбента — пористой среды, радиусы капилляров которой могут быть сопоставимы с размерами макромолекул. Описанные процессы определяют длительность процесса формирования надмолекулярной структуры жидкости в этих условиях.

На следующей фазе осуществляются дальнейшая достройка и упрочнение граничных слоев, перекрытие ими порового объема. Появление здесь модуля сдвига свидетельствует о качественном и количественном изменении типа и характеристик модифицированной надмолекулярной структуры фильтрата, переходе от вязкопластичной к вязкоупругой системе.

Третья стадия контактного взаимодействия характеризуется завершением процессов структурообразования и структурно-механической кольматации порового пространства, приводящих к резкому изменению фильтрационных показателей (кривые 1 указанных выше рисунков).



Puc. 4. Зависимость объема фильтрата раствора на основе Celpol SL от величины давления

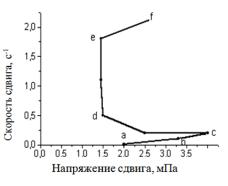


Рис. 5. Типичная кривая течения высококонцентрированной дисперсной системы по [8]

Подобная модификация фильтрата и пористой среды приводит к эффектам, характерным для вязкоупругих систем — скачкам давления, возникающим на установившейся фазе фильтрации. Аналогичные явления отмечаются и в других независимых исследованиях [6]. Важно подчеркнуть, что амплитуда их возрастает с уменьшением проницаемости керна — увеличением площади контактного взаимодействия, что говорит о поверхностной природе рассматриваемого явления.

Полученные нами данные дают основание полагать, что причиной скачков давления является разрыв сплошности среды, наблюдаемый в обычных условиях в концентрированных системах — суспензиях, растворах полимеров или их расплавах [7, 8] или, как в нашем случае, при контактном взаимодействии с породой в разбавленных растворах (содержание биополимера не более 0,5 %) [2, 3]. Нетрудно заметить, что зависимость перепада давления от времени (см. рис. 3, кривая 1), перестроенная в других координатах «объем фильтрата — давление» (рис. 4), имеет четко выраженные S-е участки с отрицательным углом наклона, характерные для течения с разрывом сплошности (рис. 5).

Не останавливаясь на детальном описании механизма этого явления, подробно изложенного в работах [7, 8], рассмотрим лишь его прикладные аспекты. На представленной типичной кривой течения вязкоупругого тела, можно выделить участок ламинарного движения (ab). В точке b возникает режим эластической турбулентности, характеризуемый наличием больших обратимых деформаций. Кривой cd отвечает заметная аномалия вязкости, которая уменьшается с ростом температуры. В точке d скорость деформации достигает уже критического значения, приводя к резкому росту текучести полимера и уменьшению его взаимодействия со стенками капилляра. Это приводит к срыву потока (вертикальный участок de), резкому падению фильтрационного сопротивления и повышению расхода жидкости.

Перепад давления в этом случае локализуется во входной зоне канала, где резко возрастающая скорость течения полимера приводит к разрыву сплошности надмолекулярной структуры и кратковременному скачку расхода жидкости.

Следует подчеркнуть, что давление на входе в капилляра не распространяется на весь объем поровой жидкости, поэтому последняя находится при пониженном давлении и с более высокой вязкостью, усиливая тем самым изолирующие качества фильтрата, которые в этих условиях будут сохраняться и при закритических давлениях.

Таким образом, описываемый эффект выполняет функцию своего рода клапана, снижающего величину действующего давления в поровом канале до уровня, соответствующего разрыву сплошности, что в реальных условиях должно дополнительно усиливать изолирующие качества полимерных растворов. В фильтрационном эксперименте этот эффект макроскопически проявляется в колебаниях величины давления из-за разрыва сплошности фильтрата в капиллярах керна, где приложенное внешнее давление достигает предела прочности.

Из изложенного видна принципиальная разница в гидродинамике вязкопластичных и вязкоупругих растворов. В растворах первого типа при критических давлениях, превышающих предел прочности, надмолекулярная структура раствора разрушается, и величина вязкости кратно снижается. В растворах второго типа изза разрыва континиума и снижения давления в поровых каналах фильтрационное сопротивление остается почти на исходном уровне.

В реальных условиях для вязкопластичных буровых систем это приводит к резкому снижению их антифильтрационных качеств, прорыву фильтрата и загрязнению приствольной области.

Необходимо указать, что при освоении скважин преимущества вязкоупругих систем могут стать их недостатком, по той же причине снижение эффективного давления из-за разрыва сплошности будет осложнять извлечение фильтрата.

Описанные выше фильтрационные и микрореологические исследования позволили оптимизировать компонентный состав буровых растворов, выявить особенности экранирования призабойной зоны с помощью явления структурномеханической кольматации и адаптировать их в соответствующей технологии.

Резюмируя изложенное, можно отметить, что контактные явления на границе жидкость — твердое тело, не обнаруживаемые стандартными методиками анализа буровых растворов, играют определяющую роль в подземной гидродинамике, и их необходимо учитывать уже на стадии разработки новых технологических жидкостей. Для этого необходимы и новые инструменты — методики и измерительная техника, позволяющие в отличие от длительных и трудоемких фильтрационных испытаний проводить экспресс-оценку влияния межфазных взаимодействий на эксплуатационные характеристики.

Библиографический список

- 1. Андресон Б. А., Гилязов Р. М. Буровые растворы на полигликолевой основе для бурения и заканчивания скважин. – Уфа: УГНТУ, 2001. – 88 с.
- 2. Физико-химические основы применения безглинистых полисахаридных растворов для заканчивания скважин: моногр. / Б. А. Андресон [и др.]. Уфа, 2004. 250 с.
- 3. Кондрашев О. Ф. Физико-химические основы регулирования изолирующих свойств безглинистых полисахаридных буровых растворов: Автореф. дис. . . . д-ра техн. наук. Уфа, 2005. 40 с.
- 4. Кондрашев О. Ф., Шарипов А. У. Модификация структурно-механических свойств полимеров в пористой среде. М.: Геоинформак, 2000. 56 с.
- 5. Адсорбция из растворов на поверхности твердых тел / Под ред. Γ . Парфитта, К. Винтера. М.: Мир, 1986. 256 с.
- 6. Шарипов А. У. Научные и технологические основы применения полимерных растворов при бурении и заканчивании глубоких скважин. М.: ВНИИОЭНГ, 1991. 57 с.
 - 7. Виноградов В. Г., Малкин А. Я. Реология полимеров. М.: Химия, 1977. 440 с.
 - 8. Юрьев Н. Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. М.: Химия, 1980. 320 с.

Сведения об авторе

Кондрашев Олег Федорович, д. т. н., доцент, профессор кафедры физики, Уфимский государственный нефтяной технический университет, e-mail: kondr of@mail.ru

Information about the author

Kondrashev O. F., Doctor of Engineering, Associate Professor, Professor at the Department of Physics, Ufa State Petroleum Technological University, e-mail: kondr of@mail.ru