



УДК 532.546.544.725

## МИКРОРЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛИМЕРНЫХ БУРОВЫХ РАСТВОРАХ

### MICRORHEOLOGICAL EFFECTS IN POLYMERIC BORING

**Кондрашев Олег Федорович**

доктор технических наук, доцент,  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
kondr\_of@mail.ru

**Kondrashev Oleg Fedorovich**

Doctor of Engineering, associate professor,  
Ufa state oil technical university  
kondr\_of@mail.ru

**Аннотация.** Установлено, что фильтрат полимерного бурового раствора при контактном взаимодействии с пористой среде формирует граничные слои, соизмеримые с размерами пор, и приобретает вязкоупругие свойства, что существенно усиливает его антифильтрационные характеристики и ограничивает глубину проникновения.

**Annotation.** It is established that the polymer mud filtrate in contact with a porous medium forms boundary layers commensurate with the pore size and acquires viscoelastic properties, which significantly enhances its anti-filtration characteristics and limits the depth of penetration.

**Ключевые слова:** контактное взаимодействие, граничный слой, узкий зазор, фильтрация, изолирующие свойства, микрореологияструктурно-механическая кольматация, разрыв сплошности.

**Keywords:** contact interaction, boundary layer, narrow gap, filtration isolating properties, a mikroreologiyastrukturno-mechanical kolmatation, a rupture of a sploshnost.

Необходимость в дополнительных, помимо средств стандартных 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 геолого-техническим 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 пласта лишь в ряде случаев – при несоизмеримости размеров макромолекул и пор, невысоких пластовых температурах, то есть в условиях не характерных для эксплуатации.

По этой причине для усиления изолирующих качеств новых буровых систем было решено задействовать структурно-механическую кольматацию, возникающую при контактном взаимодействии фильтрата с породой. Теоретическим обоснованием этой идеи послужили известные исследования П.А. Ребиндера и др. [2] 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 имеющие аномальные физические свойства – повышенную вязкость и сдвиговую упругость, которые, как правило, не проявляются у жидкости в обычных, объемных условиях [3–5].

С этих позиций становится понятным, почему стандартная буровая реометрия, адаптированная к более простым в реологическом отношении вязкопластичным глинистым растворам и неориентированная на анализ контактного взаимодействия жидкости с твердым телом, не фиксирует 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 пород и моделях пор, результаты которых обсуждаются ниже

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

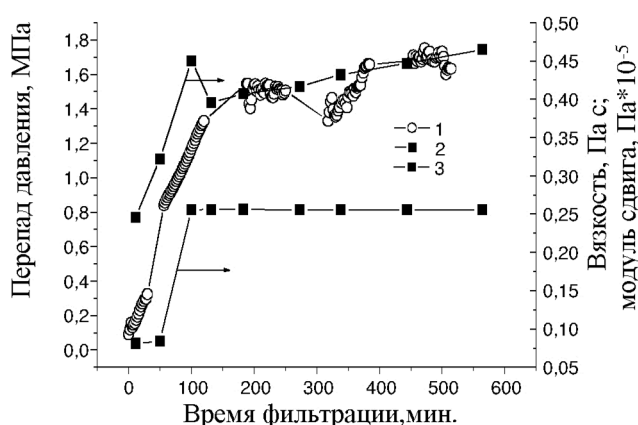
Микрореологические измерения были проведены по авторской методике [4], дающей возможность получать данные о физическом состоянии жидкости в порах микронного размера – о толщине граничных слоев, формирующихся на пороодообразующих минералах, ее структурно-механических характеристиках в порах, характерных для продуктивных пластов, критических значениях напряжений-градиентов, переводящих жидкость в подвижное состояние.



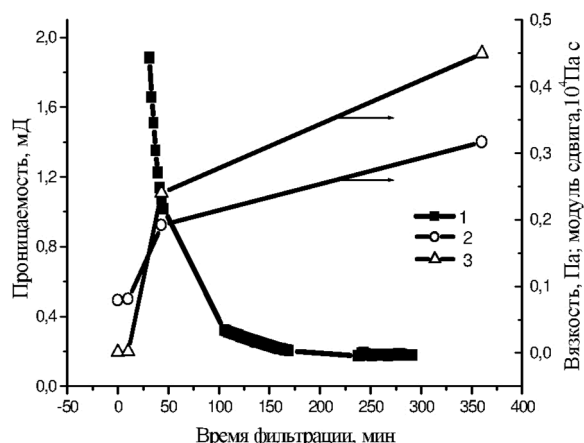
Измерительная ячейка экспериментальной установки (в дальнейшем узкий зазор), реализующая динамический вариант известного прибора Вейлера-Ребиндера, представляет собой плоский капилляр – две кварцевые пластины, закрепленные на упругом подвесе. Оригинальная механическая подвеска обеспечивает тангенциальность 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 давлениях.

Комплексные исследования с применением макро- и микроскопических методов позволили выявить основные закономерности структурно-механической коагуляции в разрабатываемых буровых системах, на кратком описании которых остановимся ниже, и использовать их для улучшения их эксплуатационных характеристик.

Анализ совмещенных во времени фильтрационных и микрореологических данных дает наглядное представление о механизме фильтрации изучаемых жидкостей; их синхронное изменение прямо указывает на определяющую роль межфазных взаимодействий в этом процессе (рис. 1 и 2).



**Рисунок 1** – Зависимость перепада давления (1), вязкости (2) и модуля сдвига (3) от времени в узком зазоре 5 мкм для раствора на основе Selpol SL



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

Видно, что уже на первых минутах контактного взаимодействия резко увеличивается динамическая вязкость (кривые 2), кратно превышая свое объемное значение. В формируемой при этом надмолекулярной структуре пристенного граничного слоя появляются и вязкоупругие качества, что следует из динамики сдвиговой упругости (кривые 3) и других рассматриваемых параметров.

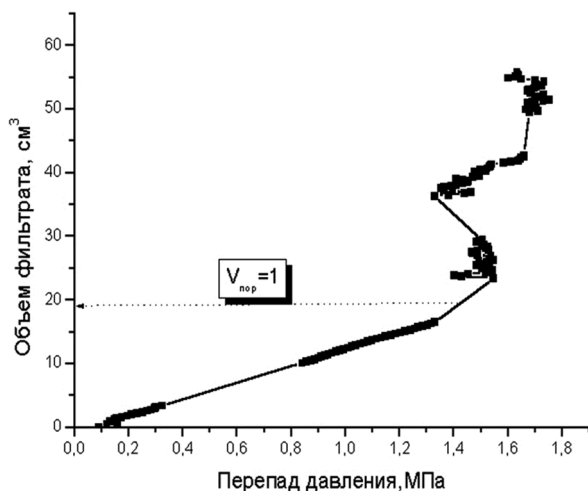
Первая и наиболее быстрая стадия структурообразования – формирование граничных слоев и упрочнение по этой причине поровой жидкости завершается за 50–100 минут в зависимости от типа образца и приводит к закупорке – структурно-механической коагуляции интервала пор диаметром до 5 мкм, судя по синхронному снижению проницаемости (рис. 2, кривая 1) и росту давления (см. рис. 1, кривая 2).

На следующей более медленной из-за стерических эффектов стадии контактного взаимодействия идет дальнейшее упрочнение структуры фильтрата в порах, а на фильтрационных кривых в условиях практически равновесной фильтрации появляются скачки давления, отмечаемые и в других независимых фильтрационных исследованиях [6–8]. Важно подчеркнуть, что как в нашей работе, отмечается эффект увеличения их амплитуды с уменьшением проницаемости зерна, что однозначно указывает на молекулярно-поверхностную природу этого явления. Дальнейшие микрореологические исследования течения этих жидкостей в узких зазорах позволили установить и причину их возникновения – разрыв сплошности фильтрата. Этот вывод следует из наличия на кривых фильтрации (рис. 3) и течения (рис. 4) характерных S-ных участков с отрицательным углом наклона, где скорость растет при уменьшении силового фактора. Для более удобного сравнения фильтрационная кривая (рис.3) построена по данным (рис. 1), но в координатах «объем фильтрата – перепад давления», аналогичным реологическим «скорость сдвига – напряжение сдвига».

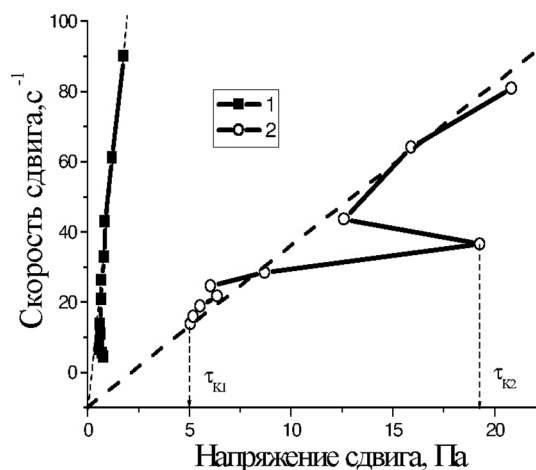
Известно, что подобная аномалия вызвана разрывом континуума среды и присуща в обычных условиях концентрированным системам – суспензиям, растворам полимеров или их расплавам [9, 10]. В нашем случае в разбавленных растворах (концентрация биополимера не более 0,5 %) этот эффект возникает вследствие появления вязкоупругих свойств у фильтрата при контактом взаимодействии с породой и не обнаруживается, как отмечалось выше, стандартными средствами. Не останавливаясь на подробном описании механизма этого явления, подробно изложенного в [4, 9, 10], рас-



смотрим лишь его прикладные аспекты. Разрыв сплошности возникает во входном сечении порового канала, препятствуя распространению критического давления на остальной объем поровой жидкости и усиливая тем самым изолирующие качества фильтра, который в этом режиме способен выдерживать закритические значения давления. Иными словами, разрыв сплошности выполняет здесь функции своего рода предохранительного клапана, сбрасывая высокое давление, что макроскопически, на фильтрационной кривой проявляется в виде скачков давления, и обеспечивая тем самым его докритический уровень в самой поре.



**Рисунок 3** – Зависимость объема фильтра полисахаридного раствора на основе Celvol SL от величины давления



**Рисунок 4** – Кривые течения полисахаридного раствора через 4 (1) и 24 (2) часа в узком зазоре 2 мкм

Следует подчеркнуть, что отмеченное принципиально отличает вязкоупругие жидкости от вязкопластичных, которые в подобных условиях теряют свои антифильтрационные качества, способствуя тем самым прорыву фильтра и загрязнению пристольной области.

Необходимо указать, что при освоении скважин преимущества вязкоупругих систем могут стать их недостатком по той же причине – снижение величины эффективного давления из-за разрыва сплошности будет затруднять извлечение фильтра и практически необратимо загрязнять пористую среду. Из-за недостатка информации о физическом состоянии высокомолекулярного фильтра в пористой среде подобное довольно часто встречается в практике нефтеразработки.

Проведение дополнительных исследований макро- и микроскопическими методами позволило выявить факторы структурно-механической коагуляции, определяющие изолирующие свойства высокомолекулярных растворов без твердой фазы – образование граничных пристенных слоев, уменьшающих эффективное сечение поровых каналов, структурирование остального объема фильтра в порах за счет дальнего действия поверхностных сил и, при достижении вязкоупругого состояния, разрыв сплошности в поровых каналах соответствующего размера.

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

### Литература:

1. Андресон Б.А., Гилязов Р.М. Буровые растворы на полигликолевой основе для бурения и заканчивания скважин. – Уфа : Изд. УГНТУ, 2001. – 88 с.
2. Кусаков М.М., Ребиндер П.А., Зинченко Е.А. Поверхностные явления в процессах фильтрации нефтей // Доклад АН СССР. – 1940. – Т. 28. – С. 342–426.
3. Физико-химические основы применения безглинистых полисахаридных растворов для заканчивания скважин : монография / Б.А. Андресон [и др.]. – Уфа, 2004. – 250 с.
4. Кондрашев О.Ф. Физико-химические основы регулирования изолирующих свойств безглинистых полисахаридных буровых растворов : Автореф. дисс. ... д-ра. техн. наук / УГНТУ. – Уфа, 2005. – 40 с.
5. Кондрашев О.Ф., Шарипов А.У. Модификация структурно-механических свойств полимеров в пористой среде. – М. : Геоинформак, 2000. – 56 с.



6. Вакула В.Л., Притыкин Л.М. Физическая химия полимеров. – М. : Химия, 1984. – 224 с.
7. Шарипов А.У. Научные и технологические основы применения полимерных растворов при бурении и заканчивании глубоких скважин. – М. : ВНИИОЭНГ, 1991. – 57 с.
8. Рогачев М.К., Кондрашев А.О., Кондрашев О.Ф. Водоизоляционный полимерный состав для низкопроницаемых коллекторов // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 4. – С. 63–65.
9. Виноградов В.Г., Малкин А.Я. Реология полимеров. – М. : Химия, 1977. – 440 с.
10. Юрьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. – М. : Химия, 1980. – 320 с.

#### References:

1. Andreson B.A., Gilyazov R.M. Boring solutions on the polyglycoleft basis for drilling and completion of wells. – Ufa : Prod. UGNTU, 2001. – 88 p.
2. Kusakov M.M., Reh binder P.A., Zinchenko E.A. The superficial phenomena in processes of filtration nefty // Report of Academy of Sciences of the USSR. – 1940. – V. 28. – P. 342–426.
3. Physical and chemical bases of use of clay-free polisakharidny solutions for completion of wells : monograph / B.A. Andreson [etc.]. – Ufa, 2004. – 250 p.
4. Kondrashev O.F. Physical and chemical bases of regulation of the isolating properties clay-free polysaharidnyh boring solutions : Avtoref. yew. ... Dr. tech. sciences / UGNTU. – Ufa, 2005. – 40 p.
5. Kondrashev O.F., Sharipov A.U. Modification of structural and mechanical properties of polymers in the porous environment. – М. : Geoinformak, 2000. – 56 p.
6. Vakula V.L., Pritykin L.M. Physical chemistry of polymers. – М. : Chemistry, 1984. – 224 p.
7. Sharipov A.U. Scientific and technological bases of use of polymeric solutions during the drilling and completion of deep wells. – М. : VNIIOENG, 1991. – 57 p.
8. Rogachyov M.K., Kondrashev A.O., Kondrashev O.F. Water insulating polymeric structure for low-permeability collectors // Oil economy. – 2014. – № 4. – P. 63–65.
9. Vinogradov V.G., Malkin A.Ya. Rheology of polymers. – М. : Chemistry, 1977. – 440 p.
10. Yuryev N.B. The high-concentrated disperse systems. – М. : Chemistry, 1980. – 320 p.