



УДК 532.546:544.725

ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ РАСТВОРОВ БЕЗ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ



EVALUATION OF THE DEPTH OF PERMISSION OF SOLUTIONS WITHOUT A SOLID PHASE

Кондрашев Олег Федорович

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры физики,
Уфимский государственный
нефтяной технический университет
kondr_of@mail.ru

Kondrashev Oleg Fedorovich

Ph.D., Associate Professor of Physics,
Ufa State Petroleum Technical University
kondr_of@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы применения системного подхода к пластовой системе жидкость – порода и учета изменений физических свойств контактирующих фаз при анализе и прогнозировании продвижения буровых растворов в пласт.

Annotation. The article discusses the application of a systematic approach to the fluid-rock formation system and taking into account changes in the physical properties of the contacting phases in the analysis and prediction of the progress of drilling fluids into the formation.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, граничные слои, пористая среда, изолирующие свойства, вязкопластичность, вязкоупругость, разрыв сплошности.

Keywords: contact interaction, boundary layers, porous medium, viscoplasticity, viscoelasticity, discontinuity.

При разработке буровых растворов без твердой фазы в АНК Башнефть для тестирования их изолирующих качеств, обеспечивающих сохранение продуктивных свойств пласта при бурении, помимо стандартных методик, были проведены специальные исследования их структурно-механических параметров в порах микронного размера.

Необходимость дополнительных экспериментов была вызвана отсутствием ряда данных (физические свойства фильтрата и его подвижность в пластовых условиях, кинетика контактного взаимодействия флюидов с породой, критические напряжения течения и т.п.), требуемых для прогнозирования продвижения жидкости в пласт.

Для решения поставленной задачи применялась методика и установка для микрореологических измерений в порах микронного масштаба [1]. Измерительная ячейка установки представляет собой модель поры из двух пластин породообразующего минерала (кварц), расстояние между которыми (узкий зазор) может изменяться в диапазоне, характерном для нефтяных коллекторов.

Объектом исследования служили образцы безглинистых растворов для наклонных и горизонтальных скважин – полимер-солевой (ПАА марки Alcomer-110 или Poly-Kem D, минерализованная вода) и биополимерный (биополимер Kem-X, водопроводная вода) [2]. Содержание высокомолекулярных соединений не превышает 0,4 %, о наличии и концентрации других функциональных добавок будет указано ниже при обсуждении результатов.

Анализ микрореологических измерений в узких зазорах величиной 5–26 мкм, то есть в диапазоне, охватывающем интервал средних значений радиусов пор в объектах бурения, показал, что вязкопластичные по данным стандартных измерений объемных свойств, растворы приобретают качества квазикристаллического тела с повышенной (~20 мПа·с в объеме) динамической вязкостью и сдвиговой упругостью (рис. 1 и 2). Динамика контактного взаимодействия, как видно, зависит от величины узкого зазора и компонентного состава; более минерализованный полимер-солевой раствор (кривые 1, 2) отличается более высокой скоростью формирования надмолекулярной структуры, в то время как второй образец выходит на установившееся значение в течение суток (кривые 3, 4). Специальные исследования показали, что подобное отличие связано с подвижностью кинетических элементов вблизи границы жидкость-твердое тело; в более минерализованной среде катионы солей подавляют электростатическое отталкивание анионных звеньев полимеров, способствуя более компактной конформации макромолекул и их высокой подвижности [2, 3]. В другом образце, в силу меньшей концентрации солей и неполной компенсации противоионов, конформация макромолекул более линейна, что приводит к снижению их подвижности и соответствующему увеличению периода структурообразования.

Следует подчеркнуть, что временные характеристики описываемых процессов представляют интерес с точки зрения прогнозирования глубины проникновения фильтрата с учетом времени формирования вязкоупругих «пробок» фильтрата, ограничивающих охват пористой среды фильтрацией.

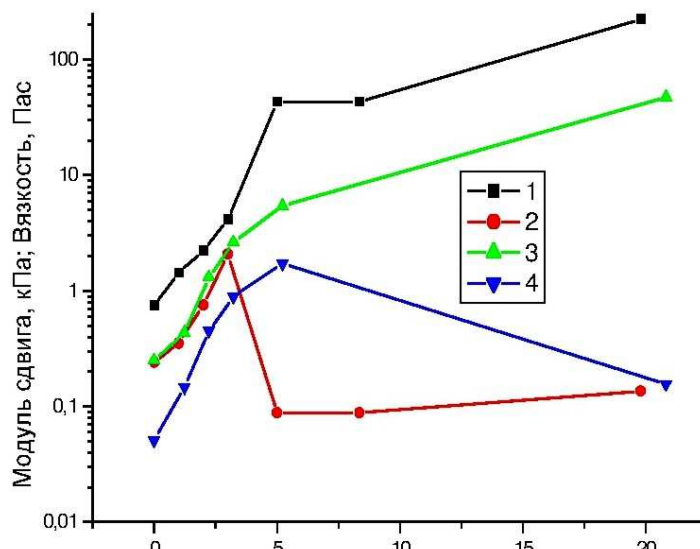


Рисунок 1 – Динамика упругих (1,3) и вязких (2,4) биополимерного раствора в узких зазорах 5,2 (1,2) и 26,2 (3,4) мкм

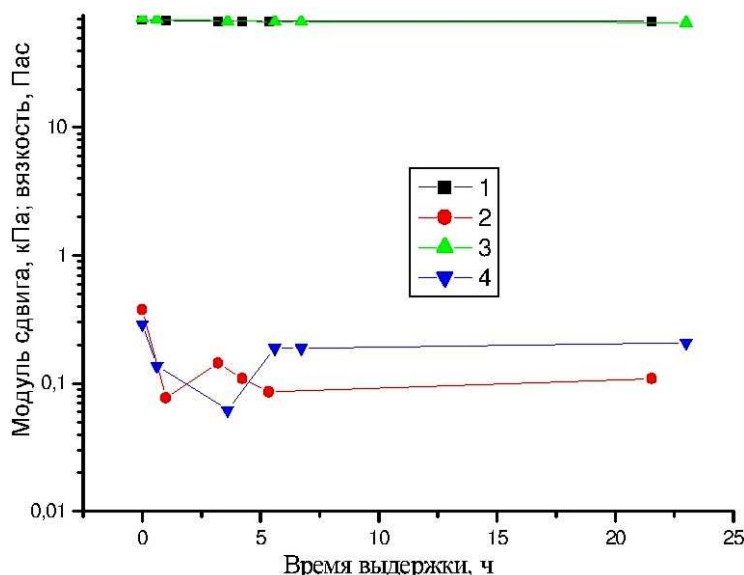


Рисунок 2 – То же для полимер-солевого раствора узких зазорах 5,2 (1,2) 10 (3,4) мкм

Важна с этих позиций и информация о деструкции фильтрата в пористой среде; по нашим данным при длительной экспозиции (~3 месяца) биополимерного раствора в узком зазоре 26 мкм величина критического напряжения сдвига снижается в 40 раз. Это существенно упрощает процесс извлечение фильтрата при освоении скважин.

Прочность вязкоупругих пробок, колюматизирующих пористую среду, можно оценить по уровню критических напряжений из кривых течения. На примере подобной зависимости для одного из растворов отчетливо видно необходимость учета контактного взаимодействия в гидродинамике буровых растворов (рис. 3). Даже в крупных зазорах (кривая 2) характер течения не отвечает вязкопластичной модели; при напряжениях сдвига более 10 Па наступает дилатантный, а не пластический режим. Еще более принципиальные отличия от этой модели наблюдаются по мере уменьшения величины узкого зазора (кривая 1); приведенный фрагмент кривой течения имеет S-ную форму – признак разрыва континуума, присущего твердообразным системам – расплавам и концентрированным растворам полимеров [4]. В нашем случае, на межфазной границе этот эффект проявляется при существенно меньшем содержании высокомолекулярных компонентов (~0,4 %). Обращает внимание и масштаб напряжений, превышающий более чем на порядок данные стандартных измерений.

Однако, это далеко не полное описание следствий контактного взаимодействия фильтрата с породой, так как изменения претерпевают и характеристики твердой фазы вследствие образования на поверхности поровых каналов адсорбционно-солевых или граничных слоев, которые по литературным данным могут достигать десятков мкм [1, 3].

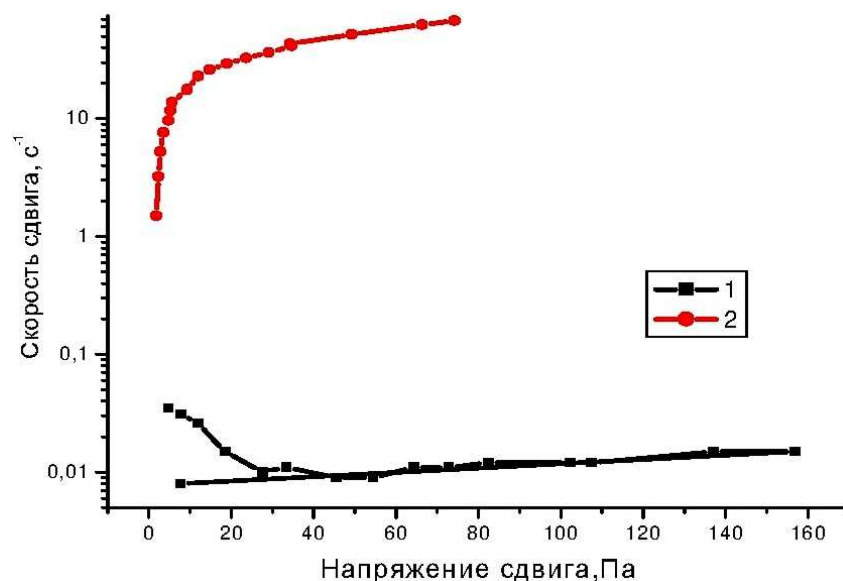


Рисунок 3 – Кривые течения биополимерного раствора после 20 час. выдержки в узких зазорах 5,2 (1) и 26,2 (2) мкм

В нашем случае размеры граничных слоев изучаемых растворов определялись по точке перегиба зависимости структуро-чувствительного параметра (динамическая вязкость или скорость сдвига) от величины узкого зазора, так как монотонность подобной зависимости может нарушаться при наложении граничных слоев, образующихся на стенках пор. Толщина их является величиной эффективной, зависящей от внешних (размер пор, скорость сдвига) и внутренних факторов (компонентный состав) и варьировала для наших образцов в диапазоне 1,2 – 6,8 мкм.

Количественный анализ изолирующих свойств растворов с учетом модификации их свойств при контактном взаимодействии можно провести, исходя из следующих соображений.

Очевидно, что при наличии данных о перепаде давления (ΔP) между скважиной и пластом, а также предельном градиенте давления (Gr), обусловленного вязкоупругими свойствами фильтра, возможную глубину проникновения последнего можно оценить из соотношения между ними [5]:

$$L = \frac{\Delta P}{Gr}, \tag{1}$$

где $Gr = 2R^* / \tau_0^*$, а τ_0^*, R^* – соответственно эффективные значения критического напряжения сдвига и радиуса порового канала, являющиеся функциями времени контактного взаимодействия, величины узкого зазора и действующих значений напряжений или скоростей сдвига. В частности, $R^* = R - h_0$, где R – геометрический радиус поры, h_0 – эффективная толщина граничного слоя.

Полученные данные рассмотренных образцов растворов приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Зависимость глубины проникновения биополимерного раствора от времени и депрессии

Время контакта, час	Перепад давления, МПа	Эффективный радиус, мкм	Глубина проникновения, м
0,50	0,1	13,0	0,64
0,77	1,0	12,0	1,60
2,08	1,5	12,0	2,00
3,33	2,0	11,0	1,70
4,58	5,0	10,0	1,30
24,0	5,0	9,5	1,70

Видно, что в соответствии с динамикой структурообразования, описанной выше, вначале из-за более высокой скорости коагуляции полимер-солевой образец демонстрирует лучшие изолирующие свойства, спустя 5 часов эти показатели становятся соизмеримыми, а далее превалирует биополимерный образец.



Таблица 2 – Зависимость глубины проникновения полимер-солевого раствора от времени и депрессии

Время контакта, час	Перепад давления, МПа	Эффективный радиус, мкм	Глубина проникновения, м
0,50	0,1	12,0	0,18
1,17	1,0	11,0	0,37
2,75	1,5	10,7	0,60
4,15	2,0	10,4	0,85
5,70	5,0	10,0	1,10
10,0	5,0	10,0	1,80

Полученные данные позволяют решить и обратную задачу по определению величины перепада давления, необходимого для извлечения проникшего в пласт фильтрата. Из (1) следует, что если буровая жидкость проникла в пласт на глубину L , то для ее извлечения необходимо давление величиной не менее $Gr \cdot L$, то есть

$$\Delta P = \frac{2 \cdot \tau_0^* \cdot L}{R^*} \tag{2}$$

Из последнего следует, что искомое давление определяется величиной начального напряжения сдвига и эффективного радиуса пор, которые вследствие деструкции эмульсионных и биополимерных растворов со временем уменьшаются. Отсюда, величина депрессии при освоении скважин для указанного типа растворов может быть кратно ниже, чем при их проводке.

Полученные нами микрореологические параметры состояния растворов также дают возможность количественной оценки расхода в порах разного диаметра по известному уравнению Букингама:

$$q = \frac{\pi R^4 Gr}{8\eta} \left(1 - \frac{8\tau_0}{3RGr} + \frac{16\tau_0^4}{3R^4 Gr^4} \right), \tag{3}$$

Расчет проводился по двум вариантам. В первом случае величина R принималась равной геометрическому радиусу поры, а η – объемной вязкости. Во втором – учитывалось молекулярно-поверхностное взаимодействие жидкости с породой, поэтому приведенные выше параметры являлись функциями толщины граничного слоя, времени контактного взаимодействия и действующих напряжений сдвига (табл. 3).

Таблица 3 – Расход биополимерного раствора в зависимости от времени и перепада давления в поре диаметром 26 мкм

Время контакта, час	Эффективная вязкость, МПа	Градиент давления, МПа/м	Расход по Пуазейлю, м³/с	Расход по Букингаму, м³/с
0,50	0,139	$1,5 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$2,9 \cdot 10^{-22}$
0,77	0,063	$5,6 \cdot 10^4$	$4,0 \cdot 10^{-14}$	$6,2 \cdot 10^{-17}$
2,08	0,520	$4,1 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^{-14}$	$1,6 \cdot 10^{-15}$
3,33	0,063	$5,4 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^{-14}$	$4,1 \cdot 10^{-15}$
4,58	0,050	$4,4 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^{-14}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$
24,0	0,072	$7,8 \cdot 10^4$	$4,3 \cdot 10^{-14}$	$2,8 \cdot 10^{-14}$

Видно, что пренебрежение молекулярно-поверхностными эффектами – изменением вязкости и эффективных размеров пор вследствие наличия граничного слоя, что обычно делается при гидродинамических расчетах, значительно завышает параметры фильтрации буровой жидкости даже в крупных капиллярах.

Литература

1. Кондрашев О.Ф., Шарипов А.У. Модификация структурно-механических свойств полимеров в пористой среде. – М. : Геоинформак, 2000. – 56 с.
2. Андресон Б.А., Гилязов Р.М., Гибадуллин Н.З., Кондрашев О.Ф. Физико-химические основы применения безглинистых полисахаридных растворов для заканчивания скважин : монография. – Уфа, 2004. – 250 с.
3. Липатов Ю.С. Коллоидная химия полимеров. – Киев : Наукова Думка, 1984. – 340 с.
4. Виноградов В.Г., Малкин А.Я. Реология полимеров. – М. : Химия, 1977. – 440 с.
5. Мирзаджанзаде А.Х., Ентов В.М. Гидродинамика в бурении. – М. : Недра, 1985. – 196 с.



References

1. Kondrashev O.F., Sharipov A.U. Modification of the structural and mechanical properties of polymers in a porous medium. – М. : Geoinformak, 2000. – 56 p.
2. Andreson B.A., Gilyazov R.M., Gibadullin N.Z., Kondrashev O.F. Physicochemical principles of the use of non-clay polysaccharide solutions for well completion : Monograph. – Ufa, 2004. – 250 p.
3. Lipatov Yu.S. Colloidal chemistry of polymers. – Kiev : Naukova Dumka, 1984. – 340 p.
4. Vinogradov V.G., Malkin A.Ya. Rheology of polymers. – М. : Chemistry, 1977. – 440 p.
5. Mirzadzhanzade A.Kh., Enotov V.M. Hydrodynamics in Drilling. – М. : Nedra, 1985. – 196 p.