

УДК 622.245

## ОБ АНОМАЛЬНОМ ПОВЕДЕНИИ ФИЛЬТРАТОВ ЦЕМЕНТНЫХ РАСТВОРОВ В ТОНКИХ ПОРАХ И КАПИЛЛЯРАХ

Ф.А. Агзамов, Б.Т. Умралиев, С.Ф. Комлева, О.Ф. Кондрашев

*Загрязнение продуктивных пластов при креплении скважин можно снизить за счет изменения свойств фильтратов в тонких порах пластов, в которых фильтраты, содержащие высокомолекулярные соединения, приобретают аномальную вязкость и структурируются, приобретая свойства твердообразных систем. Проведенные исследования показали возможность использования аномальных свойств фильтратов для регулирования водоотдачи тампонажных растворов.*

*Ключевые слова: цементный раствор; фильтр; водоотдача; неньютоновские свойства; поверхностные явления.*

### Введение

Широко распространенные в настоящее время технологии первичного вскрытия и разобщения пластов не всегда обеспечивают сохранность их коллекторских свойств на этапах заканчивания скважин. Особенно эта проблема актуальна при цементировании эксплуатационных колонн, когда имеет место загрязнение продуктивных пластов фильтратом тампонажных растворов.

Технологические приемы, ограничивающие или предупреждающие контакт цементного раствора с продуктивным

пластом, часто неэффективны из-за ограничений по устойчивости коллекторов, различий в пористости и проницаемости пропластков многопластовых залежей.

Наиболее перспективным направлением предупреждения загрязнения продуктивных пластов при их креплении является снижение водоотдачи тампонажных материалов. К сожалению, многие из применяемых реагентов-понижителей водоотдачи обладают отрицательными побочными эффектами, заключающимися в загущении тампонажных растворов и ухудшении свойств полученного камня.

### Основная часть

Многочисленные результаты промышленных и лабораторных исследований свидетельствуют о том, что нарушение естественного равновесия в системе скважина – пласт при воздействии технологических растворов приводит к снижению проницаемости околоскважинной зоны. Различают ряд факторов, поясняющих суть данного явления, которые обобщены и описаны в работах [1–4].

Процесс цементирования скважин является одним из наиболее ответственных с точки зрения сохранности продуктивных пластов. Проблема заключается в том, что в пласт дополнительно поступает жидкость, резко отличающаяся по своим свойствам от пластовых флюидов и фильтрата промывочной жидкости.

Даже при небольшом перепаде давления свободная вода из цементного раствора может полностью отфильтровываться за 1,5–3,0 мин. Механизм воздействия фильтрата цементного раствора на пластоколлектор во многом аналогичен воздей-

ствию фильтрата промывочных жидкостей [4]. Отличие состоит в том, что фильтрат цементного раствора содержит большое количество  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , и, кроме этого, с жидкой фазой в пласты фильтруются продукты гидратации цемента и даже частицы твердой фазы, которые при определенных условиях могут образовать в порах пласта конгломераты, оказывающие дополнительное кольматирующее воздействие на пласт.

Хотя при цементировании время контакта тампонажного раствора с продуктивным пластом значительно меньше, чем у промывочной жидкости, более высокая водоотдача цементных растворов приводит к существенному загрязнению пристволевой зоны.

Проведенные промышленные исследования на месторождениях Башкортостана, Татарстана и Западной Сибири показали существенное различие результатов освоения в коллекторах разного типа [5, 6]. Если отрицательное влияние процесса це-

ментирования на коллекторские свойства трещиноватых, порово-трещиноватых пород безусловно, ибо при этом в пласт проникает не только фильтрат, но и твердая фаза тампонажного раствора, то в терригенных поровых коллекторах воздействие тампонажного раствора на пласт может быть связано только с проникновением в него фильтрата тампонажного раствора.

В частности, исследования Агзамова Ф.А., Кореняко А.В. и др. на кернях продуктивных пластов Суторминского месторождения показали, что после воздействия фильтрата цементного раствора коэффициент восстановления проницаемости кернов не превышал 60% [6]. При этом для поровых коллекторов снижение репрессии на продуктивные пласты в 3–4 раза приводило к повышению продуктивности в 1,7 раза. Также установлено, что скважины с открытым забоем имели продуктивность выше в 4 и более раза по сравнению со скважинами с закрытым забоем. Судя по этим показателям, роль фильтрата цементного раствора более очевидна.

Коллекторами нефти на данном месторождении являлись юрские песчаники с открытой пористостью 15–18 % и проницаемостью 0,02–0,04 мкм<sup>2</sup>, залегающие на глубинах 2900–3200 м. Плотность бурового раствора при вскрытии продуктивного пласта составляла 1150–1160 кг/м<sup>3</sup>, а тампонажного раствора при цементировании – 1780–1840 кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, одним из главных факторов снижения удельной продуктивности при цементировании скважин является более высокое значение репрессии на пласт по сравнению с ее значением при первичном вскрытии и последующее загрязнение пласта фильтратом тампонажного раствора.

Доказательством сказанному могут служить и данные по начальным дебитам скважин, зацементированных одно- и двух-

ступенчатым способами по 2 кустам Кирско-Катынского лицензионного участка, расположенного в Западной Сибири (табл. 1–2).

В среднем удельные дебиты в зависимости от пластов при двухступенчатом цементировании выше в 1,3–6,2 раза по сравнению с одноступенчатым способом цементирования. Эти данные свидетельствуют об эффективности двухступенчатого способа цементирования при низкой проницаемости пластов (<10 мД).

Причины столь существенных изменений могут быть в следующем.

Объем тампонажного раствора, прокачиваемого через продуктивный пласт и контактирующего с ним, составляет при:

одноступенчатом способе – 65–70 м<sup>3</sup>;  
двухступенчатом способе – 25–30 м<sup>3</sup>.

Давление столба цементного раствора при:

одноступенчатом способе – 41,0–50,0 МПа;

двухступенчатом способе – 32,0–40,0 МПа.

Очевидно, что происходит уменьшение времени контакта с пластом в 2–2,5 раза, снижение давления столба цементного раствора на пласт примерно на 10,0 МПа и, как следствие, пропорциональное снижение объемов проникновения фильтрата в 2–2,3 раза при двухступенчатом способе цементирования.

Именно поэтому вопросы управления водоотдачей тампонажных растворов стали выходить на первый план.

Мы считаем, что для снижения водоотдачи тампонажных растворов необходимо использовать химические реагенты, оказывающие минимальное отрицательное воздействие на свойства раствора и камня на его основе. Эти реагенты должны ограничить количество фильтрата, проникающего в пласт, и не должны изменять фазовой проницаемости пласта для нефти.

**Таблица 1. Влияние способа цементирования на удельные дебиты скважин (куст 3)**

№ скв.	Способ цементирования	Характеристика пласта					K <sub>пр</sub> , мД	Q <sub>н</sub> , т/сут	q <sub>н</sub> , т/сут-м	q <sub>н,ср</sub> , т/сут-м
		h <sub>эф</sub> , м	h <sub>эф(н+в)</sub> , м	h <sub>перф</sub> , м	h <sub>перф</sub> , м	h <sub>перф</sub> , м				
3/454	одноступенчатый	-	4,1	5,5	6,7	6,7	2,1	0,38	0,566	
3/455		-	6,3	5,0	н/д	2,0	0,4			
3/456		11,1	-	9,0	н/д	6,65	0,74			
3/101	двухступенчатый	13,4	-	11,0	5,7	7,97	0,72	0,763		
3/102		12,1	-	11,0	н/д	8,38	0,76			
3/451		9,9	-	10,0	6,3	7,33	0,73			
3/452		7,0	-	5,0	2,6	3,15	0,63			
3/53		15,5	-	10,0	6,3	10,0	1,0			

**Таблица 2. Влияние способа цементирования на удельные дебиты скважин (куст 7)**

№ скв.	Способ цементирования	h <sub>перф</sub> , м	Q <sub>н</sub> , т/сут	q <sub>н</sub> , т/сут-м	q <sub>н,ср</sub> , т/сут-м
7/516	одноступенчатый	8,8	3,45	0,34	1,29
7/517		8,5	10,25	1,21	
7/175		13,0	12,6	0,96	
7/515		10,5	20,37	2,04	
7/173		12,0	27,4	2,28	
7/174	двухступенчатый	24,0	22,85	0,95	4,18
7/149		4,2	4,3	1,02	
7/147		2,0	12,08	6,04	
7/514		3,5	19,2	5,49	

Примечание:

- h<sub>эф</sub> – эффективная толщина;
- h<sub>эф(н+в)</sub> – нефтеводонасыщенная толщина;
- h<sub>перф</sub> – высота перфорированного участка;
- K<sub>пр</sub> – коэффициент проницаемости;
- q<sub>н</sub> – удельный дебит нефти;
- q<sub>н,ср</sub> – средний удельный дебит нефти;
- Q<sub>н</sub> – дебит скважины.

Многие негативные явления, по нашему мнению, обусловлены недостатком информации о фильтрационных свойствах растворов, поскольку при оценке их водоотдачи по существующим методикам имеется несоответствие с реальными условиями скважины. Если в условиях реального пласта процесс фильтрации происходит в пористой среде, где всевозможные эффекты на поверхности раздела фильтрат – твердое тело, в частности, капиллярные явления, играют не последнюю роль, то на традиционных приборах фильтрация происходит через тонкий фильтр. Совершенно очевидно, что отличие в фильтрационных средах не может не влиять на результаты испытаний.

В настоящее время на практике фильтрационные свойства тампонажных материалов оцениваются, как правило, по коэффициенту водоотдачи – количеству жидкости, проходящей через малопроницаемую мембрану при заданном перепаде давления. Скорость фильтрации при этом пропорциональна дисперсности цемента, его концентрации в растворе и вязкости. При подобном способе величина данного показателя определяется толщиной и плотностью цементной корки, а также объемными свойствами жидкой фазы. Продолжительность опыта – ~30 мин, что существенно меньше времени структурообразования тампонажного раствора, поэтому за данное время жидкость не успевает мобилизоваться в формирующуюся структуру раствора.

Из ранее проведенных исследований следует, что объемная вязкость, определяющая величину водоотдачи и скорость ее изменения, пропорциональна тангенсу угла наклона в течение всего времени наблюдения для воды (рис. 1, прямая 1) или первых минут фильтрации полимерных растворов (линии 2 и 3).

Из ранее проведенных исследований следует, что объемная вязкость, определяющая величину водоотдачи и скорость ее изменения, пропорциональна тангенсу угла наклона в течение всего времени наблюдения для воды (рис. 1, прямая 1) или первых минут фильтрации полимерных растворов (линии 2 и 3).

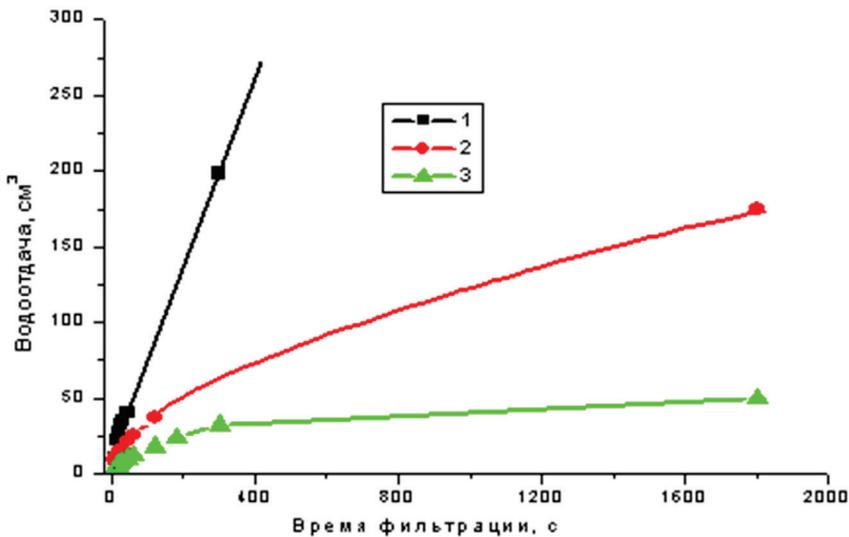
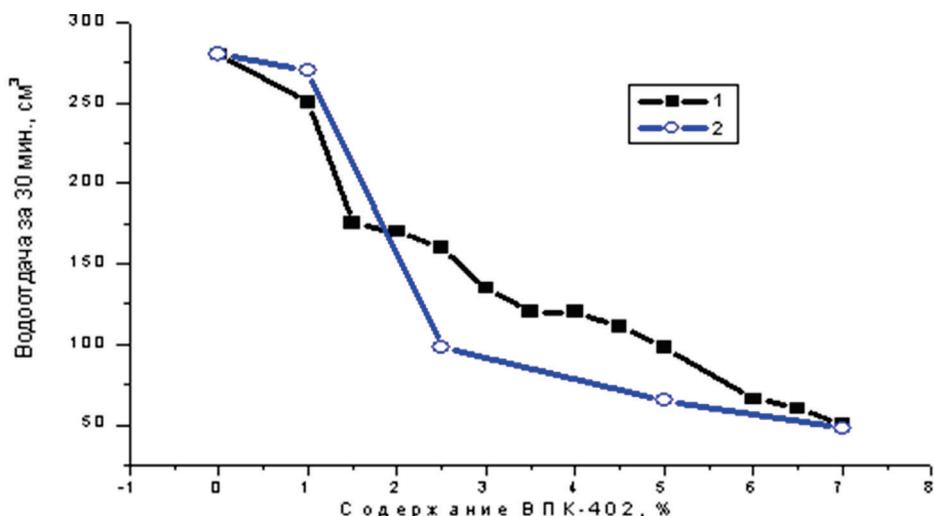


Рисунок 1. Кинетика водоотдачи водных растворов ВПК-402:  
линия 1 – 0%; линия 2 – 1,5%; линия 3 – 7%

Нелинейность последних зависимостей, снижение скорости фильтрации на последнем этапе обусловлены образованием полимерной пленки на фильтре (фильтр-пресс, или прибор ВМ-6), фильтрационное сопротивление которой, определяемое толщиной и плотностью пленки, пропорционально концентрации высокомолекулярного соединения (далее – ВМС).

Качественное изменение кинетических кривых начинается при содержании полимера, превышающем 1%: при этом

резко уменьшается угол наклона кинетических фильтрационных зависимостей и наблюдается перегиб концентрационных кривых водоотдачи за 30 мин (рис. 2). По-видимому, указанная концентрация является критической концентрацией ассоциатообразования, при которой усиливается коллективное взаимодействие в растворе, возникают агрегаты молекул и надмолекулярная структура на их основе, приводящие к увеличению консистенции жидкости.



**Рисунок 2. Концентрационные зависимости водоотдачи водных (1) и тампонажных (2) растворов**

Из сопоставления концентрационных кривых водоотдачи для водных (линия 1) и тампонажных (линия 2) растворов одного и того же полимера можно сделать вывод о том, что при низких и высоких концентрациях полимера водоотдача последних (ПЦ – портландцемент, при водоцементном отношении (далее – В/Ц), равном 0,5) определяется теми же факторами, что и в рассмотренных выше водных растворах – объемной вязкостью дисперсионной среды и параметрами полимерной пленки.

При исследовании водных растворов полимеров обнаружился эффект резкого усиления их неньютоновских аномалий и снижения водоотдачи в присутствии солей кальция (табл. 3). Последние применяются обычно в качестве ускорителей схватывания и твердения тампонажных растворов, поэтому выявление природы указанного эффекта представляет интерес как для уточнения механизма их действия в цементном растворе, так и для прогнозирования продвижения фильтрата в пористой среде.

**Таблица 3. Сравнение вязкости водных растворов оксиэтилцеллюлозы (ОЭЦ) и их фильтратов**

№	Состав раствора, %				Водоотдача, см <sup>3</sup> /мин	Динамическая вязкость, мПа·с	
	ОЭЦ	CaCl <sub>2</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>	Техн. вода		раствор	фильтрат
1	0,40	-	-	остальн.	35/12	18,4	14,62
2	0,40	-	1,00	- " -	35/1	5,08	4,4
3	0,40	40,0	-	- " -	7/30	129,71	23,75
4	0,40	40,0	1,00	- " -	2/30	144,23	15,88

Из анализа табличных данных следует, что водоотдача водных растворов оксиэтилцеллюлозы (далее – ОЭЦ) с хлористым кальцием снижается в 5 и более раз даже при значительно меньшей продолжительности опытов с исходным (без добавок) раствором, а динамическая вязкость растворов в той же степени увеличивается.

Описанные изменения фильтрационных свойств водных растворов ВМС в присутствии неорганических солей связаны с известным эффектом «электролитного набуха-

ния», суть которого состоит в изменении конформаций молекул, их «распрямлении» или «сворачивании» при нарушении баланса сил электростатического отталкивания и притяжения под действием вводимых в систему анионов и катионов органической или неорганической природы [7]. В рассматриваемом случае катионы Ca<sup>2+</sup>, нейтрализуя отрицательно заряженные боковые группы ОЭЦ, усиливают тем самым межмолекулярное взаимодействие в объеме жидкости и ее структурную эффективную вязкость. Разрушение объ-

емной структуры раствора при течении сквозь фильтр вызывает снижение вязкости фильтра практически до исходной величины.

Если к тому же учесть, что растворы большинства полимеров при течении в тонких порах и капиллярах, как правило, проявляют аномальные свойства, то перенос результатов испытаний на фильтрационных приборах (фильтр-пресс, ВМ-6 и др.) на пластовые условия становится некорректным. В пользу такого утверждения косвенно говорит и тот факт, что растворы многих реагентов, проявляя ньютоновские свойства при течении в трубах, резко изменяют свои свойства при течении в тонких порах и капиллярах.

Поскольку поведение таких систем при течении в пористой среде будут определены, главным образом, соотношением размеров макромолекул полимеров и тонких каналов среды, то один и тот же полимер будет вести себя по-разному, в зависимости от размера каналов.

Идея состоит в использовании аномалий в поведении дисперсных систем как способа предотвращения нерегулируемого и глубокого проникновения фильтратов в продуктивный пласт. При этом реагент-понижитель водоотдачи должен в объемных (макроскопических) условиях (в трубах и затрубном пространстве) отвечать всем требованиям технологии бурения и крепления, а в пористой среде (микроскопических условиях) усиливать неньютоновские аномалии фильтратов и блокировать поровые каналы, снижая тем самым объем жидкости, проникающей в приствольную область, и уменьшая степень загрязнения последнего [8-10].

Предложенный механизм похож на технологию снижения водоотдачи за счет применения реагентов, коагулирующих поры пласта. Однако в данном случае коагуляция происходит за счет структурирования фильтра в результате действия поверхностных и капиллярных сил, создания структурно-механического барьера, блокирующего поры и препятствующего дальнейшему продвижению фильтра в пласт.

Степень структурирования зависит от размера пор, заряда поверхности, вида и концентрации полимера, поэтому выбираемые реагенты не будут иметь универсальный характер: каждый из них имеет вполне определенную область эффективного применения по размерам пор, составу коллектора, давлению, температуре и т.п.

Принципиально важно, что жидкость затворения при этом не удаляется из там-

понажного раствора, а, значит, он не меняет своих характеристик и не вызывает осложнения в процессе цементирования. Естественно, реагент должен оказать минимально вредное влияние на технологические свойства цементного раствора и камня.

Возможность снижения проницаемости фильтрующей породы за счет высоковязких веществ, находящихся в пласте, можно показать на примере гелеобразующих композиций на основе биополимеров или алюмосиликатов [11]. В то же время гелеобразующие композиции для эффективной работы должны глубоко проникать в пласт, а реагенты-понижители водоотдачи, работающие по предложенному механизму, должны сохранять коллекторские свойства пласта за счет минимального проникновения в пласт.

В соответствии с положениями физико-химической механики дисперсных систем жидкость на границе раздела приобретает свойства контактирующих фаз, т.е. на границе с твердой фазой – породой – она должна приобретать твердообразные свойства, формируя пристенные (граничные) слои с аномально высокими структурно-механическими свойствами. Подобных явлений в пористой среде следует ожидать и от фильтратов буровых и тампонажных растворов, представляющих собой смесь высокомолекулярных органических и неорганических компонентов.

По этой причине для направленного регулирования фильтрационных характеристик и прогнозирования глубины проникновения фильтратов в пласт стандартных показателей фильтрационных свойств, характеризующих величину водоотдачи, далеко недостаточно.

Микрореологические (в масштабе пор) исследования полимерных регуляторов фильтрации проводились на оригинальной установке, реализующей схему прибора Вейлера–Рейбинера [12]. Суть метода исследования, реализуемого в установке, состоит в регистрации изменений резонансных параметров колебательной системы, вызванных вязкими или упругими свойствами жидкости, контактирующей с твердым телом в зазорах различной величины. Диапазон моделируемой в опытах проницаемости пористой среды охватывал интервал от тысячных до десятых долей мкм<sup>2</sup>.

По полученным данным рассчитываются реологические и гидродинамические параметры жидкости в порах данного размера. Преимуществом данного метода

исследования по сравнению с другими, применяемыми в реометрии буровых растворов, является возможность получения информации о физическом состоянии и условиях движения флюидов в пористой среде, что может быть непосредственно использовано в гидродинамических расчетах при бурении или разработке нефтяных месторождений.

При проведении экспериментов образец исследуемой жидкости – фильтрата цементного раствора – помещался в рабочий узел установки – узкий зазор фиксированной величины, соответствующий характерным размерам пористой среды. При этом исследовалась кинетика структурообразования образца жидкости, ее установившиеся структурно-механические свойства как при фиксированной скорости сдвига, так и в широком интервале, охватывающем значения последней в пристволенной и забойной зонах.

Характерным для опытов на пористой среде является увеличение перепада давления в пределах порядка и пропорциональное снижение проницаемости уже в течение первого часа фильтрации или после прохождения одного порового объема фильтрата. Последнее связано со структурно-механической коагуляцией пористой среды, а именно процессом «запечатывания» пор из-за модификации надмолекулярной структуры фильтрата при контакте с породой.

На это однозначно указывает сопоставление фильтрационных и микрореологических параметров в реальном масштабе времени. В узких зазорах, размеры

которых соответствуют среднему радиусу ядер, вязкопластичные (по стандартным методикам) жидкости приобретают несвойственные им в обычных условиях аномальные физические свойства: появляются модуль сдвига и вязкость, величина которой возрастает в пределах порядка. Это означает, что применение нестандартного подхода к разработке технологических жидкостей позволяет подобрать компонентный состав, обеспечивающий надежную изоляцию пристволенной области от загрязнения уже на начальном этапе.

В качестве регуляторов фильтрации тампонажных материалов рассматривались гипван (гелеобразующий состав на основе акрилового полимера), ОЭЦ (оксиэтилцеллюлоза), гипан (гидролизированный полиакрилонитрил), ВПК (синтетический полиэлектролит катионного типа) и др. [9].

Установлено, что в порах микронной толщины разбавленные водные растворы полимеров проявляют вязкоупругие свойства, не свойственные подобным жидкостям в обычных условиях: динамическая вязкость кратно превышает объемные значения этого параметра, а наличие сдвиговой упругости, характеризующей способность тел к сопротивлению изменению формы, указывает на наличие твердообразной структуры в данных растворах.

При этом микрореологические параметры плохо коррелируют с объемными. К примеру, гипан и ВПК-402 имеют весьма посредственные стандартные объемные показатели, в порах же они превосходят по своим свойствам более высокомолекулярные образцы (табл. 4).

**Таблица 4. Вязкоупругие свойства растворов полимеров в узких зазорах**

Полимер	Концентрация, %	Размер зазора, мкм	Эффективная вязкость, мПа·с	Модуль сдвига, кПа
ВПК-402	0,2	1,5	59,4	2,83
ВПК-402	0,2	6,0	55,2	1,43
ВПК-402	0,5	1,5	53,3	2,59
ВПК-402	0,5	6,0	20,5	1,62
Гипан	0,2	1,5	171	0,14
Гипан	0,2	6,0	101	0,15
Гипан	0,5	1,5	15,2	0,27
Гипан	0,5	6,0	12,2	0,09
ПАА	0,2	1,5	10,4	0,10
ПАА	0,2	6,0	10,0	0,06
ПАА	0,5	1,5	66,7	0,24
ПАА	0,5	6,0	31,0	0,09
КМЦ-600	0,5	1,5	44,2	0,18
КМЦ-600	0,5	6,0	31,8	0,05

Например, для ВПК-402 по мере уменьшения величины узкого зазора неньютоновские аномалии заметно усиливаются, и кривая течения приобретает характерный для твердообразного тела вид, количественные характеристики которого превосходят аналогичные параметры других реагентов.

Следует отметить, что заметные изменения при фильтрации наблюдались только при концентрациях полимера выше 1,0 %. По мере уменьшения величины узкого зазора неньютоновские аномалии заметно усиливаются, и кривая течения приобретает характерные для твердообразного тела вид, количественные характеристики которого (эффективная динамическая вязкость, критические напряжения сдвига) кратно превосходят аналогичные параметры гипана и других реагентов.

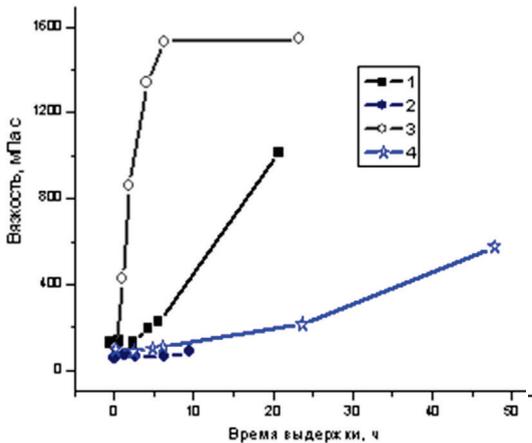
Более сильная модификация структурно-механических свойств ВПК-402, уступающего по стандартным показателям растворов другим реагентам, обусловлена

спецификой молекулярно-поверхностного взаимодействия жидкости с твердым телом. Опыт исследований пластовых флюидов, полимерных растворов и безглинистых промывочных жидкостей [2] говорит о том, что подобный эффект, степень модификации определяется действием двух конкурирующих процессов – когезионным и адгезионным взаимодействием в системе жидкость – твердое тело.

Для количественной оценки фильтрационных качеств фильтрата в пористой среде необходимы данные о консистенции и факторах, определяющих ее в этих условиях, динамике структурно-механических свойств, характере и условиях движения в поровых каналах разной величины.

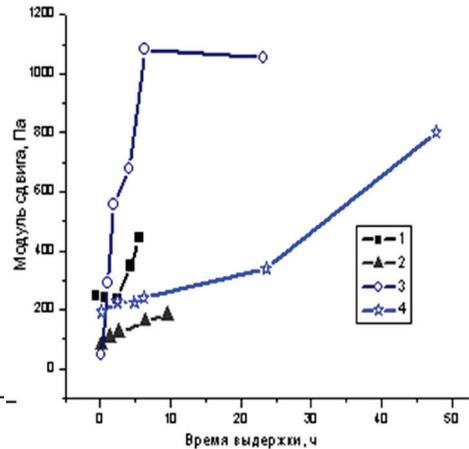
На первом этапе решения этой задачи исследовались фильтраты цементных растворов ( $V/C = 0,5-1,0$ ) без каких-либо функциональных добавок.

Полученные данные свидетельствуют об аномально высоких структурно-механических свойствах фильтрата в узких зазорах микронной величины (рис. 3-4).



**Рисунок 3.** Влияние размера капилляра на вязкость фильтрата цементного раствора: 1 – 1 мкм ( $V/C = 1,0$ ); 2 – 2 мкм ( $V/C = 1,0$ ); 3 – 2 мкм ( $V/C = 0,5$ ); 4 – 5 мкм ( $V/C = 0,5$ )

Из рисунков видно, что уже в начале контактного взаимодействия вязкость всех проб достигает  $\sim 100$  мПа·с, что кратно превышает объемные значения этого параметра. Дальнейшее изменение вязкости определяется величиной узкого зазора (линии 1 и 2, 3 и 4) и  $V/C$  (линии 2 и 3), и уменьшение этих факторов приводит к усилению неньютоновских свойств фильтрата. По уровню консистенции линии 1



**Рисунок 4.** Влияние размера капилляра на упругие свойства фильтрата цементного раствора: 1 – 1 мкм ( $V/C = 1,0$ ); 2 – 2 мкм ( $V/C = 1,0$ ); 3 – 2 мкм ( $V/C = 0,5$ ); 4 – 5 мкм ( $V/C = 0,5$ )

и 3 соответствуют гелеобразному состоянию образцов, объемная вязкость которых не превышает 56 мПа·с.

Факторы, обуславливающие аномальные свойства, – водоцементное отношение ( $V/C$ ) и размер узкого зазора – имеют сугубо поверхностную природу: уменьшение зазора усиливает действие твердой фазы, а микрочастицы цемента, как наполнитель дисперсной системы, увеличивают

площадь контактного взаимодействия и дополнительно структурируют фильтрат в поровом объеме. Этим объясняются более высокие скорости структурообразования и уровень вязкости при снижении величины В/Ц (линия 3).

Анализ особенностей течения образцов фильтрата показал, что оно отвечает реологической модели вязкопластичного тела, а критические напряжения – градиенты давления – в этих условиях соизмеримы с призабойными. Последнее дает основание полагать, что малопроницаемые пропластки могут быть надежно «запечатаны» за счет структурно-механической кольматации фильтрата даже без добавок ВМС.

Из приведенных данных следует, что перечисленные выше факторы оказывают существенное влияние на все фазы структурообразования и уровень модификации структурно-механических свойств: уменьшают размеры узкого зазора (линии 1, 2 и 3, 4) и В/Ц (линии 3, 4), увеличивают угол наклона кривых, пропорциональный скорости формирования надмолекулярной структуры и величину вязкоупругих свойств. Подобное действие оказывает увеличение количества цемента в растворе на стандартные показатели тампонажных суспензий, снижая растекаемость образцов и водоотдачу по мере увеличения его доли в растворе.

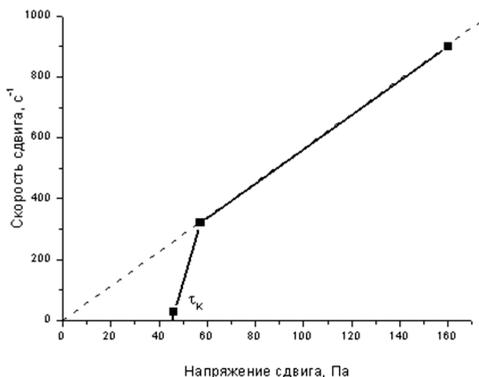
Принципиальным здесь является различие в компонентном и долевом составе сравниваемых образцов – собственно тампонажного раствора и его фильтрата, представляющего собой его дисперсионную среду. Влияние В/Ц в последнем случае имеет сугубо поверхностную природу и обусловлено дополнительным «объемным» структурированием фильтрата в узком зазоре на твердой фазе – частицах цемента, оставшихся в жидкой фазе после филь-

трации через мембрану прибора фильтра, либо кристаллах гидратных образований. Механизм этого явления описан П.А. Ребиндером [13] и состоит в увеличении количества гранично-связанной жидкости в поровом объеме за счет контактного взаимодействия со взвешенными частицами твердой фазы, что эквивалентно усилению действия поля твердой поверхности или уменьшению величины узкого зазора. Этот механизм позволяет объяснить и более сильную зависимость микрореологических свойств фильтрата от величины В/Ц, чем от размеров узкого зазора: видно, что вязкость и упругость фильтрата с меньшим В/Ц в зазоре 5 мкм соизмеримы с такими же показателями жидкости в значительно меньшем капилляре, но с В/Ц = 1,0 (линии 1 и 4).

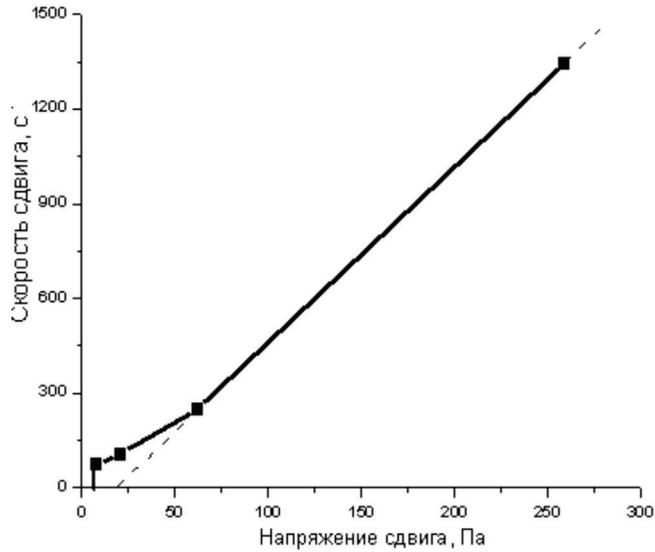
При выдержке фильтрата, полученного из раствора с большим В/Ц, в узком зазоре свыше 20 ч он приобретает свойства структурированной неньютоновской жидкости (рис. 5).

Такой закон течения характерен для коагуляционных структур, обладающих тиксотропными свойствами. Отсутствие начального напряжения сдвига говорит о том, что движение фильтрата в пористой среде возможно даже при малых перепадах давления, а его «водоотдача» будет высокой.

Увеличение доли цемента вдвое способствует возникновению твердообразной структуры, на что указывает наличие предельного напряжения сдвига и несходимость линейной части кривой течения в начало координат (рис. 6). Подобная кривая течения характерна для более хрупких структур кристаллизационного типа на основе гидроалюмината. Течение фильтрата здесь возникает при напряжениях, превышающих критическое (~11,2 Па).



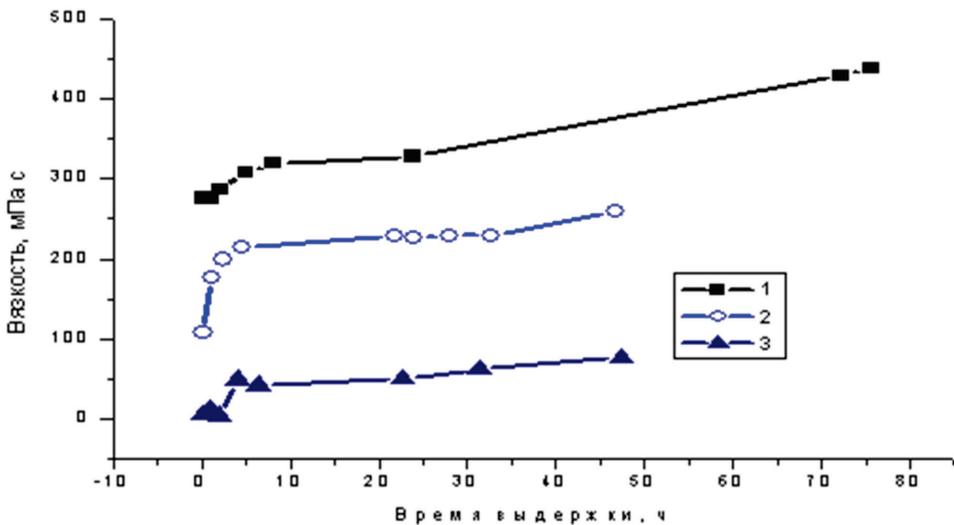
**Рисунок 5. Кривая течения фильтрата (В/Ц = 1,0) после 22 ч выдержки в узком зазоре 1 мкм**



**Рисунок 6. Кривая течения фильтра с В/Ц = 0,5 после 30 ч выдержки в узком зазоре 2 мкм**

Изменение концентрации полимера неаддитивно влияет на все показатели фильтра. При малых концентрациях ВПК-402 фильтр характеризуется относительно низкой вязкостью и высокой скоростью структурообразования на первом

этапе контактного взаимодействия и сильной зависимостью от размеров узкого зазора (рис. 7). Динамика структурообразования, как видно из приведенных данных, резко снижается через 5–6 ч выдержки фильтра в узком зазоре.



**Рисунок 7. Динамика вязких свойств фильтра с 5%-й добавкой ВПК-402 в узких зазорах разной величины: 1- 1 мкм; 2 – 2 мкм; 3 – 5 мкм**

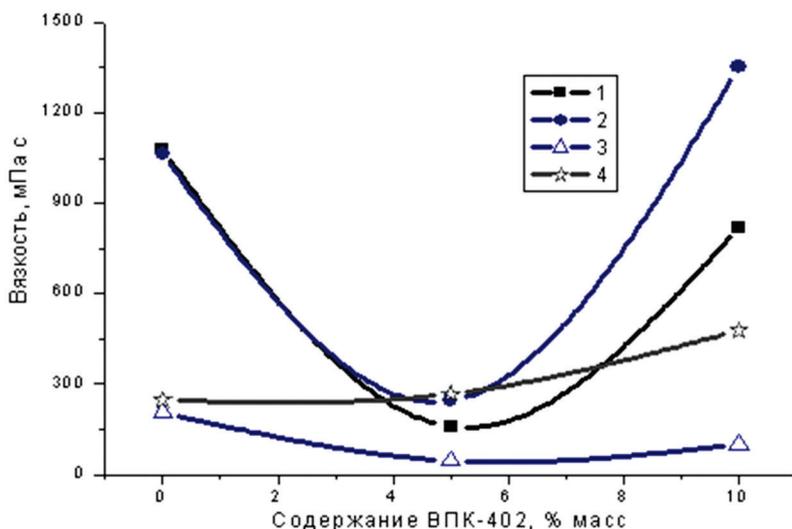
Увеличение доли полимера в растворе до 10% приводит к непропорциональному росту вязкости и увеличению продолжительности структурообразования на поздней стадии. Описанные явления имеют молекулярно-поверхностную природу, что следует из сильной зависимости рассматриваемых параметров фильтрата от величины узкого зазора.

В пористой среде на эти факторы накладывается действие капиллярных и поверхностных сил, еще более усложняющих анализ протекающих процессов.

Обобщение микрореологических исследований фильтрата с добавками полимера в диапазоне концентраций 0–10% показывает, что в узких зазорах малого

размера (до 2 мкм) исходный фильтрат по уровню структурно-механических свойств и динамике их нарастания превосходит его растворы с ВПК-402, причем по мере увеличения зазора продолжительность индукционного периода снижается.

Нелинейная, экстремальная зависимость неньютоновских свойств жидкости, их динамики от величины узкого зазора и концентрации является характерной особенностью структурообразования на межфазных границах и имеет молекулярно-поверхностную природу. Из рис. 8 видно, что по мере увеличения диаметра пор кривизна рассматриваемых зависимостей уменьшается, и они приобретают все более линейный характер (линии 3 и 4).



**Рисунок 8. Зависимость вязкости фильтрата от концентрации ВПК-402, времени выдержки и величины узкого зазора: 1 – 10 ч, 2 мкм; 2 – 10 ч, 5 мкм; 3 – 10 ч, 5 мкм; 4 – 10 ч, 5 мкм;**

Практический аспект обсуждаемых результатов состоит в том, что они позволяют обосновать область рационального применения понизителей водоотдачи. В частности, из представленных данных следует, что в порах малой величины (диаметр до 2 мкм) фильтрат и его концентрированный раствор (линии 1 и 2) проявляют подобные вязкие свойства, что дает основание исключить применение полимерной добавки в низкопроницаемых пропластках проницаемостью до тысячных долей мкм<sup>2</sup>. Более того, как видно из тех же кривых, малые дозы полимера напротив могут привести к снижению вязкости флюида и его прорыву в приствольную зону. В более проницаемых коллекторах для увеличения фильтрационного сопротивления применение полимерного реагента оправдано

и необходимо, поскольку оно возрастает пропорционально количеству полимера в растворе.

## Выводы

Лабораторными и промышленными исследованиями установлен новый фактор регулирования антифильтрационных свойств технологических буровых жидкостей – структурно-механическая кольматация пористой среды, обусловленная усилением неньютоновских свойств фильтрата при контакте с породой.

Применение изложенного в практике бурения требует изменения сложившихся стереотипов о способах сохранения продуктивных свойств пласта и принципиаль-

ной модификации стандартных методик анализа водоотдачи технологических буровых жидкостей.

Реагенты-понижители водоотдачи тампонажных растворов должны в объемных условиях в затрубном пространстве отвечать всем требованиям технологии цементирования, а в пористой среде усиливать неньютоновские аномалии фильтрации и блокировать поровые каналы, снижая тем самым объем фильтрации в пристволенной области и степень загрязнения последней.

По оригинальной методике определены микрореологические свойства фильтратов тампонажных растворов. Установлено, что фильтрат цементного раствора в узких зазорах микронной величины проявляет аномально высокие структурно-механические свойства. В самом начале контактного взаимодействия его вязкость достигает ~100 мПа\*с, чтократно превышает объемные значения этого параметра. С уменьшением величины узкого зазора и водоцементного отношения неньютоновские свойства фильтрации усиливаются.

## Список использованной литературы

Шахмаев З.М., Рахматуллин В.Р. Физико-химическое воздействие буровых растворов на продуктивные пласты. – Тезисы докладов сем. - дискуссии по проблемам первичного и вторичного вскрытия пластов при строительстве и эксплуатации вертикальных, наклонных и горизонтальных скважин УГНТУ, Уфа, 1996, с. 49-53.

Андресон Б.А., Гилязов Р.М., Гибадуллин Н.З., Кондрашев О.Ф. Физико-химические основы применения безглинистых полисахаридных растворов для заканчивания скважин. – Уфа, 2004, 250 с.

Петров Н.А., Кореняко А.В., Типикин С.Н. и др. Конструкции забоев скважин в геолого-технических условиях Ноябрьского региона (Обзорная информация). – ВНИИОЭНГ, М., 1997, 68 с.

Петров Н.А., Агзамов Ф.А., Измухамбетов Б.С., Ногаев Н.А. Катионоактивные ПАВ – эффективные ингибиторы в технологических процессах нефтегазовой промышленности. – Недра, СПб., 2004, 408с.

Абдрахманов Г.С., Ибатуллин Р.Х. Техника и технология защиты продуктивных пластов от блокирования буровым и цементным растворами. – Тезисы докладов сем. – дискуссии по проблемам первичного и вторичного вскрытия пластов при строительстве и эксплуатации вертикальных, наклонных и горизонтальных скважин. – УГНТУ, Уфа, 1996, с. 33-35.

Петров Н.А., Кореняко А.В., Есипенко А.И., Агзамов Ф.А. и др. Комплексная технология строительства скважин с использованием гидрофобизаторов в технологических жидкостях и высокочастотных технических средств для обработки стенок скважины в компоновках колонн (Обзорная информация). – ВНИИОЭНГ, М., 1997, 72 с.

Виноградов В.Г., Малкин А.Я. Реология полимеров. – Химия, М., 1977, 440 с.

Кондрашев О.Ф., Шарипов А.У. Модификация структурно-механических свойств полимеров в пористой среде. – Геоинформак, М., 2000, 56 с.

Комлева С.Ф., Измухамбетов Б.С., Кондрашев О.Ф. Тампонажные растворы с пониженной водоотдачей. Под редакцией Агзамова Ф.А. – Уфа, 2008, 188 с.

Агзамов Ф.А., Кондрашев О.Ф., Комлева С.Ф. О необходимости учета коллекторских свойств пласта при выборе реагентов регуляторов фильтрационных характеристик буровых и тампонажных растворов. – Научно-технический журнал «Георесурсы», 2012, № 3 (44), с. 55-61.

Галлямов И.М., Плотников И.Г., Шувалов А.В., Гарифуллин Ш.С. Гелеобразующие технологии на основе алюмохлорида. – Нефтяное хозяйство, 1996, №2, с.32-35.

Кондрашев О.Ф., Шарипов А.У. Исследование микрореологических свойства полимерных буровых растворов. – Изв. вузов. Серия.: Нефть и газ., 2002, № 2, с. 30-37.

Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. – Наука, М., 1979, с. 381.

## ЖҰҚА КЕУЕКТЕР МЕН КАПИЛЛЯРЛАРДАҒЫ ЦЕМЕНТ ЕРІТІНДІЛЕРІ СҮЗІНДІЛЕРІНІҢ ҚАЛЫПТАН ТЫС ӨРЕКЕТІ ТУРАЛЫ

**Ф.А. Агзамов, Б.Т. Өмірәлиев, С.Ф. Комлева, О.Ф. Кондрашев**

Ұңғымаларды бекіту кезінде өнімді қабаттардың ластануын жұқа қабаттардағы фильтраттардың қасиеттерін өзгерту арқылы азайтуға болады, онда жоғары молекулалық қосылыстары бар фильтраттар қалыптан тыс тұтқырлыққа ие болады және қатты жүйелердің қасиеттерін алу үшін құрылымдалған. Жүргізілген зерттеулер тампонаждық ерітінділердің су бергіштігін реттеу үшін фильтраттардың аномальды қасиеттерін пайдалану мүмкіндігін көрсетті.

Түйінді сөздер: цемент ерітіндісі; фильтрат; су бергіштік; ньютондық емес қасиеттер; жер үсті құбылыстар.

## THE ANOMALOUS BEHAVIOR OF FILTERS OF CEMENT SOLUTIONS IN FINE PORES AND CAPILLARS

**F.A. AGZAMOV, B.T. UMRALIYEV, S.F. KOMLEVA, O.F. KONDRASHEV**

Contamination of productive formations during well casing can be reduced by taking into account changes in the properties of filtrate in thin pores of formations, in which filtrates containing high-molecular compounds acquire abnormal viscosity and are structured, acquiring the properties of solid-like systems. The studies have shown the possibility of using the abnormal properties of the filtrate to regulate the fluid loss of cement slurries.

Key words: cement slurry; filtrate; fluid loss; non-Newtonian properties; surface phenomena.

### Информация об авторах

**Агзамов Фарит Акрамович** – докт. техн. наук, профессор, [faritag@yandex.ru](mailto:faritag@yandex.ru).

**Комлева Светлана Фаритовна** – канд. техн. наук, доцент, [svet1001@yandex.ru](mailto:svet1001@yandex.ru).

**Кондрашев Олег Федорович** – докт. техн. наук, профессор, [kondr\\_of@mail.ru](mailto:kondr_of@mail.ru).

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия.

**Умралиев Бауржан Тажикенович** – докт. техн. наук, заместитель директора департамента технологий бурения, [b.umrallyev@niikmg.kz](mailto:b.umrallyev@niikmg.kz).

ТОО «КМГ Инжиниринг», г. Нур-Султан, Казахстан.