

УДК 622.245

Ф.А. Агзамов, д.т.н., профессор Уфимского государственного нефтяного технического университета (УГНТУ), e-mail: faritag@yandex.ru; **М.А. Тихонов**, аспирант УГНТУ; **Н.Х. Каримов**, к.т.н., ООО «Цементные Технологии»

ВЛИЯНИЕ ФИБРОАРМИРОВАНИЯ НА СВОЙСТВА ТАМПОНАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Представлены результаты экспериментальных исследований фиброармированных цементов, рекомендуемых для повышения качества крепи скважины в интервалах повышенных динамических воздействий. Теоретически и экспериментально показано положительное влияние фибры на основные свойства тампонажных растворов и получаемого камня. Даны рекомендации по оптимизации составов цемента.

Портландцемент, обладая несомненными преимуществами перед другими тампонажными материалами, имеет существенные недостатки, которые снижают качество крепи. Прежде всего это относится к изоляционным свойствам цементного камня, которые часто ухудшаются при работах в обсаженных скважинах.

Выполненный в работе [1] расчет напряжений, возникающих в цементном камне при различных операциях, показал, что во многих случаях они превышают предел прочности цементного камня на растяжение. В то же время на удалении нескольких метров от зоны перфорации деформация цементного кольца может составлять 0,3–0,7 мм, что создает возможность сохранения целостности крепи скважины при соответствующей модификации цементов.

Для тампонажных материалов наиболее предпочтительным направлением повышения сопротивляемости тампонажного камня динамическим нагрузкам является дисперсное армирование [2–5], при котором волокна армирующей добавки (фибры), равномерно распределяясь в матрице и имея различное направление, могут воспринимать усилия в любом направлении, препятствуя образованию и развитию трещин в композиции. Кроме того, волокна фибры тормозят движение микродефектов, а после образования трещины в матрице волокна препятствуют ее развитию и росту за счет блокировки возникших трещин.

В то же время, по данным [2], в процессе нагружения композита эффективно работает только около 20% волокон, хотя

хаотичное распределение фибры более эффективно, чем направленное, так как позволяет лучше использовать прочность волокон, особенно при воздействии разносторонних переменных нагрузок на композиционный материал.

К настоящему времени имеется определенный опыт использования армирующих добавок в тампонажных материалах.

Наиболее активно разработка армированных тампонажных материалов проводилась во ВНИИКрнефть (ныне – НПО «Бурение») под руководством А.И. Булатова и Д.Ф. Новохатского.

В частности, В.А. Левшиным, Д.Ф. Новохатским и П.Ф. Париновым в качестве фибры рассматривались асбестовое волокно 6 и 7 сорта, а также стекловолокно и базальтовое волокно [5]. Проведенные ими исследования впервые в буровой практике показали применимость дисперсного армирования в тампонажных материалах и улучшение основных характеристик полученного цементного камня. Во ВНИИКрнефть был в свое время организован выпуск армированных цементов. Применение различного вида фибр в качестве добавок в тампонажные материалы рассматривалось и другими исследователями [6–15].

Анализ литературных данных показывает, что разрушение фиброармированных материалов является более сложным процессом, чем разрушение, например, камня из традиционного портландцемента. В общем случае разрушение армированных материалов включает процессы:

- микротрещинообразования в цементной матрице;

- растрескивания матрицы, нарушения ее сплошности и передачи нагрузки, воспринимаемой ею в разрушенном сечении, на армирующие волокна;

- разрыва отдельных волокон и передачи доли усилия, воспринимавшегося ими, на другие волокна, пересекающие разрушаемое сечение;

- потери связи компонентов с разрушением межфазной границы, сопровождающейся потерей несущей способности армирующих волокон.

На стадии разрушения фибра может работать на разрыв или на выдергивание из матрицы. Разрушение цементного камня по механизму «вырывая» фибры из матрицы приводит к недостаточному использованию прочностных возможностей фибры, особенно при ее слабом сцеплении с матрицей или малой глубине (длине) анкеровки фибры.

Максимальная реализация прочностных свойств фибры происходит при ее разрыве в процессе нагружения материала. Важнейшей характеристикой фибры является ее жесткость, характеризуемая модулем упругости E_{ϕ} . По величине модуля упругости В.В. Бабков с сотрудниками [16] в группу высокомодульных фибр включил неметаллические виды фибры на основе базальтовых, асбестовых и стеклянных волокон с $E_{\phi} = (70-250) \cdot 10^3$ МПа, а также углеродное, арамидное, карбоновое волокна с $E_{\phi} = (200-700) \cdot 10^3$ МПа.

Высокомодульная фибра может обеспечить значительное упрочнение армированного материала по отношению к исходному цементному камню – матрице при

Таблица 1. Влияние фибры на водоотделение тампонажных растворов

% добавки	Водоотделение, мл в цилиндрах с наклоном							
	Базальт, l = 3 мм		Базальт, l = 6 мм		Асбест		Полиамид	
	0°	45°	0°	45°	0°	45°	0°	45°
0	10	12	10	12	10	12	10	12
0,01	10	11	10	11	9	11	9	11
0,05	9	10	9	10	8	10	8	11
0,1	8	10	8	9	7	10	7	10
0,2	7	9	6	8	6	9	7	9
0,5	5	8	5	7	5	7	6	9

значительном повышении трещиностойкости за счет высокого соотношения модулей упругости фибры и цементного камня $E_{ф} / E_{цк} \approx 7-30$ и за счет высокого соотношения их прочностей на растяжение $\sigma_{раст.ф} / \sigma_{раст.цк} \approx 100-1000$.

Низкомодульная фибра, оказывая минимальное влияние на статическую прочность, может снижать усадочное растрескивание камня при твердении, повышать ударную вязкость, обеспечивать водоудерживающую способность растворов. Для модификации тампонажных материалов наибольший опыт применения имели асбест и базальтовая фибра. Поскольку в обществе выработалось негативное отношение к асбесту, наиболее приемлемым видом модифицирующей армирующей добавки для тампонажных материалов следует признать базальтовую фибру, которая обладает достаточной прочностью на растяжение, высоким модулем упругости, небольшим удлинением при разрыве и высокой адгезией с цементной матрицей.

Анализ экспериментальных исследований роли армирования на водоотдачу

тампонажных растворов показал, что фибра, как базальтовая, так и полиамидная, оказывает незначительное влияние на данный показатель. Влияние фибры оказалось намного меньше, чем влияние реагентов структурообразователей или понизителей водоотдачи.

В то же время влияние фибры на седиментационную устойчивость тампонажных растворов оказалось более существенным. В таблице 1 приведены некоторые результаты оценки влияния фибры на водоотделение тампонажного раствора, имеющего В/Ц = 0,55 (взято для большей наглядности) в вертикальных и наклонных цилиндрах.

Использование всех армирующих добавок снижало водоотделение тампонажных растворов. Причем для базальтовой фибры при увеличении длины волокон эффект уменьшения водоотделения в наклонных цилиндрах проявился сильнее. Мы полагаем, что эффект повышения седиментационной устойчивости связан с образованием структуры в цементном растворе, удерживающей свободную воду. Практически для всех видов фибр

характерно слабое проявление эффекта при концентрациях менее 0,05%, что, очевидно, связано с их недостаточным количеством для создания структуры, способной удерживать свободную воду в растворе.

Наилучший эффект, проявившийся при использовании в качестве фибры асбеста, объясняется тем, что асбест, имея в своем составе оксиды, близкие по составу к цементу, образует общую структуру с продуктами твердения.

Сравнивая полученные результаты с влиянием фибры на водоотдачу тампонажных растворов, следует отметить незначительное влияние фибры (в рассмотренных пределах) на данный показатель, что свидетельствует о недостаточной водоудерживающей и структурообразующей роли фибры, способной удержать свободную воду в цементном растворе при перепаде давления.

При оценке влияния фибры на контракцию при твердении тампонажных растворов было установлено, что в начальные часы (1-7 час) твердения у армированных цементов контракция на 15-25%

Таблица 2. Влияние фибры на контракцию цементов при твердении

Фибра	Кол-во, %	В/Ц	Контракция, см3 / % после твердения		
			3 часа	7 часов	12 часов
Базальтовая	0	0,4	3,1/0,62	5,1/10,2	6,8/1,36
	0,05	0,4	3,6/0,72	5,2/1,04	6,8/1,36
	0,1	0,4	3,5/0,7	5,1/1,02	6,9/1,38
	0,2	0,4	3,7/0,74	5,8/1,16	6,9/1,38
	0,5	0,4	4,1/0,82	5,6/1,12	7,0/1,4
Базальтовая	0	0,5	2,1/0,42	3,7/0,74	5,7/1,14
	0,05	0,5	2,3/0,46	3,6/0,72	5,8/1,16
	0,1	0,5	2,5/0,5	3,5/0,7	5,7/1,14
	0,2	0,5	1,9/0,38	3,7/0,74	5,9/1,18
	0,5	0,5	2,4/0,48	4,1/0,82	5,8/1,16
Полиакриловая	0,2	0,5	3,8/0,76	4,4/0,88	5,5/1,0
	0,5	0,5	5,6/1,12	5,3/1,06	5,7/1,14

Таблица 3. Влияние фибры на прочность цементного камня

% фибры	Предел прочности на сжатие, МПа в возрасте, сут.			Предел прочности на изгиб, МПа в возрасте, сут.			Предел прочности на растяжение, МПа в возрасте, сут.		
	2	7	14	2	7	14	2	7	14
0	24,5	33,8	37,5	4,04	5,67	6,68	0,65	0,91	1,27
0,1	24,6	32,9	38,4	4,32	5,83	7,00	0,82	0,93	1,35
0,5	25,7	36,9	39,6	5,31	6,17	7,43	1,06	1,24	1,42
1,0	26,7	37,7	38,9	4,94	6,31	7,71	1,20	1,35	1,44
2,0	27,4	37,7	40,8	5,65	6,41	7,89	1,29	1,48	1,52

выше, чем у неармированных цементов, но к моменту формирования кристаллизационной структуры цементного камня влияние фибры на контракцию незначительно (табл. 2).

Это объясняется тем, что контракция связана с процессами гидратации и твердения цементов, а роль фибры в этих процессах незначительна, что подтверждается отсутствием ее влияния (при концентрациях до 1,0%) на сроки схватывания цементных растворов.

Однако несмотря на незначительное внешнее влияние фибры на контракцию, она должна снизить внутренние напряжения при контракции и в определенной степени компенсировать усадку цементного камня.

Исследование механических свойств цементного камня показало, что в двухсуточном возрасте влияние фибры на

прочностные свойства цементного камня достаточно значимое. Например, при концентрации фибры 0,5 и 2,0% прирост прочности на растяжение составил 60 и 135% соответственно. Прирост прочности на изгиб при тех же концентрациях фибры составил 30 и 40%, а прирост прочности на сжатие – 5 и 12% соответственно.

Такая же закономерность относительно влияния фибры при различных видах нагружения сохраняется и в более поздние сроки твердения (табл. 3).

Эксперименты показали, что уже в возрасте двух недель фибра при концентрации до 2,0% несущественно влияет на прочность при всех видах разрушения. При меньших сроках твердения влияние фибры наиболее заметно для прочности камня на растяжение, в меньшей степени – для прочности на изгиб и сжатие. Одновременно с определением прочност-

ных показателей цементного камня на сжатие определялась их деформация в продольном и поперечном направлениях. В таблице 4 приведены обобщенные результаты определения деформации при разрушении цементного камня на сжатие. Из нее видно, что армирование повышает деформацию цементного камня при его разрушении, причем с увеличением концентрации фибры деформационная способность камня возрастает, но с повышением сроков твердения она снижается из-за упрочнения цементной матрицы.

Увеличение длины волокон фибры повышает прочность камня, особенно значимо – на растяжение и изгиб.

Оценка удароустойчивости (удельной ударной вязкости разрушения) цементного камня и влияния различных факторов на данный показатель проводилась на вертикальном динамическом копре.

Таблица 4. Влияние фибры на деформацию цементного камня при разрушении

Концентрация фибры	Деформации, мм, при разрушении на сжатие	
	Продольная	Поперечная
Возраст 2 суток		
0	0,81	0,24
0,1	0,90	0,28
0,5	1,15	0,38
1,0	1,28	0,44
2,0	1,39	0,49
Возраст 7 суток		
0	0,57	0,21
0,1	0,69	0,23
0,5	0,84	0,26
1,0	1,18	0,29
2,0	1,21	0,35
Возраст 14 суток		
0	0,49	0,17
0,1	0,53	0,18
0,5	0,60	0,25
1,0	0,93	0,26
2,0	1,03	0,30

Таблица 5. Удароустойчивость тампонажного камня

Тампонажный материал	Свойства цементного раствора			Удельная энергия разрушения Дж/см ³ после твердения, час				
	ρ, кг/м ³	В/Ц	2R, см	24	48	72	120	144
Портландцемент	1920	0,4	17	0,01	0,13	0,15	0,15	0,15
Портландцемент	1840	0,5	20	0,08	0,11	0,13	0,13	0,13
Портландцемент	1760	0,6	23	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07
95%ПЦ + 5% глины	1770	0,7	20	0,05	0,06	0,09	0,10	0,10
90%ПЦ + 10% глины	1650	0,85	20	0,04	0,06	0,06	0,08	0,08
85%ПЦ + 15% глины	1490	1,1	20	0,02	0,03	0,06	0,07	0,07
ПЦ + 0,5% фибры	1850	0,5	19	0,13	0,14	0,20	0,23	0,23
ПЦ + 1% фибры	1850	0,5	16	0,18	0,18	0,24	0,29	0,29
ПЦ + 1,5% фибры	1850	0,5	11	0,26	0,29	0,32	0,32	0,34
ПЦ + 3% фибры	1840	0,5	8	0,32	0,39	0,50	0,54	0,54
ПЦ + 0,5% асбеста	1840	0,5	18	0,09	0,10	0,11	0,11	0,11
ПЦ + 1% асбеста	1840	0,5	17	0,09	0,11	0,14	0,15	0,16
ПЦ + 1,5% асбеста	1840	0,5	13	0,09	0,13	0,16	0,13	0,14
ПЦ + 3% асбеста	1840	0,5	11	0,10	0,13	0,16	0,16	0,17

Результаты экспериментов показали, что снижение В/Ц, продолжительность твердения до трех суток, ввод базальтовой фибры или асбеста положительно сказываются на удароустойчивости цементного камня (табл. 5). Также была определена удароустойчивость камня из облегченных тампонаж-

Поскольку в настоящее время одним из активно разрабатываемых направлений является применение расширяющихся цементов, важной является оценка влияния фибры на них. При этом использованы расширяющие добавки на основе оксида кальция в количестве 10% при концентрации фибры

При твердении цементов протекает два конкурирующих процесса. Первый – усадка, вызываемая контракцией, второй – расширение, связанное с увеличением объема образовавшегося цементного геля по сравнению с объемом цемента. Суммарный результат этих процессов, разнонаправленно влияющих на

Таблица 6. Влияние фибры на расширение цементного камня при твердении

Вид фибры и длина	Кол-во, %	КЛР, %
–	–	0,36
Базальтовая, 3 мм	0,05	0,72
Базальтовая, 3 мм	0,1	1,08
Базальтовая, 3 мм	0,2	1,33
Базальтовая, 3 мм	0,5	1,69
Базальтовая, 3 мм	1,0	1,93
Полиамидная, 6 мм	0,4	0,36
Полиамидная, 6 мм	0,5	1,60

ных систем, которые сравнивались с образцами, полученными из традиционных гельцементных растворов. При этом было показано, что увеличение содержания бентонита в гельцементных растворах приводит к уменьшению удароустойчивости тампонажного камня. При любом виде фибры, любом сроке твердения и любом водоцементном отношении удельная ударная вязкость разрушения фиброармированных образцов всегда была выше, чем неармированных.

от 0 до 1,0%. Результаты экспериментов с портландцементным раствором (В/Ц = 0,5), приведенные в таблице 6, показали существенное влияние фибры на коэффициент линейного расширения (КЛР) цементного камня. В то же время известно, что фибра не участвует в реакциях гидратации цементов и не должна влиять на процессы расширения, хотя результаты экспериментов показывают обратное. Мы полагаем, что суть возможного механизма состоит в следующем.

изменение объема твердеющей системы, и будет определять усадку или расширение при твердении цементов. Поскольку при добавке фибры усадка снижается, то даже при отсутствии расширяющих добавок в цементе можно получить увеличение объема цементного камня при твердении. При использовании расширяющих добавок в фиброармированных цементах величина расширения должна быть выше за счет того, что кристаллизационное давление расширяющей добавки будет

передаваться на каркас, образованный фиброй.

Возможно, этим объясняется повышение сцепления армированных цементов с ограничивающими поверхностями, полученное нами и описанное в некоторых работах. Следует отметить еще один аспект данного вопроса. Расширяющиеся добавки всегда были малоэффективны в облегченных цементах, имеющих большую пористость из-за повышенного водосодержания. Добавка фибры приведет к формированию фибрового каркаса, на который будут опираться кристаллы гидратирующей расширяющей добавки. Таким образом, появляется возможность получения облегченных расширяющихся цементов. В то же время применительно к креплению скважин следует учитывать, что с увеличением времени твердения роль фиброармирования для цементного камня будет снижаться, поскольку цементный камень (матрица) будет упрочняться и его деформативные свойства будут ухудшаться.

ВЫВОДЫ

1. Низкая сопротивляемость тампонажного камня растягивающим напряжениям, плохие деформационные свойства и низкая ударостойчивость, характерные для большинства традиционных тампонажных материалов, являются одной из основных причин нарушения герметичности крепи скважин при операциях, проводимых внутри зацементированных обсадных колонн.
2. Важнейшие характеристики тампонажных растворов и получаемого из них цементного камня могут эффективно регулироваться применением армирующих добавок (фибры), позволяющих реализовать в цементном камне принцип композиции, когда модифицирующая добавка компенсирует недостатки цементной матрицы.
3. Фибра, не оказывая влияния на фильтрационные свойства тампонажных растворов, на 30–50% повышает их седиментационную устойчивость

благодаря образованию армированной структуры в цементном растворе, удерживающей свободную воду.

4. Повышение концентрации фибры в цементе изменяет основные физико-механические свойства получаемого камня, в частности:

- при концентрациях до 2% базальтовой фибры прочность камня в зависимости от сроков твердения возрастает: при сжатии – на 8–12%, при изгибе – на 15–35%, при растяжении – на 20–100%;
- в зависимости от сроков твердения на 50–70% повышается продольная и на 40–50% – поперечная деформация при разрушении на сжатие;
- на 30–75 % повышает абсолютные значения удельной ударной вязкости разрушения (в зависимости от В/Ц и времени твердения);
- в 2–4 раза повышает коэффициент линейного расширения цементного камня при твердении.

Литература:

1. Агзамов Ф.А., Самсыкин А.В., Губайдуллин И.М., Тихонов М.А., Семенов С.Ю., Мулюков Р.А. Моделирование динамических воздействий на крепь скважины на основе метода конечных элементов // Нефтегазовое дело: научн. техн. журн. – Т. 9. – 2011. – № 4. – С. 18–24.
2. Рабинович Ф.Н. О некоторых особенностях работы композитов на основе дисперсно-армированных бетонов // Бетон и железобетон. – 1998. – № 6. – С. 19–23.
3. Волокнистые композиционные материалы / Под ред. С.З. Бокштейна. – М.: Мир, 1967. – 284 с.
4. Композиционные материалы / Под ред. Л. Браутмана и Р. Крока. – Т. 2: Механика композиционных материалов / Ред. Дж. Сендецки. – М.: Мир, 1978. – 564 с.
5. Дисперсноармированные тампонажные материалы / Левшин В.А. и др. // Нефтяное хозяйство. – 1982. – № 3. – С. 25–27.
6. Титков Н.И. и др. Асбест – облегчающая и кольматирующая добавка к тампонажным цементам // Сб. научных тр. ВНИИБТ. – М., 1980. – 24 с.
7. Бакуштов В.С., Тангалычев Е.С. Создание высокопрочных дисперсноармированных тампонажных композиций путем увеличения контактного взаимодействия на границе раздела «волокно – матрица» // Тезисы докл. II Респ. конф. физ.-хим. механики дисперсных систем и материалов. – Киев: Наукова думка, 1981. – Ч. 1. – С. 103.
8. Дисперсно-армированный тампонажный раствор: патент Российской Федерации № 2281309 / Михеев М.А., Уляшева Н.М. и др. – Оpubл. 15.12.2002.
9. Екшибаров В.С. Разработка тампонажных материалов и технических средств с целью повышения качества заканчивания скважин: дисс. ... канд. техн. наук. – Уфа, 1993.
10. Цемент тампонажный высокотемпературный армированный: патент Российской Федерации № 2375552 / Лушнев О.А. и др. – Оpubл. 14.12.2007.
11. Фиброармированный материал для цементирования продуктивных интервалов, подверженных перфорации в процессе освоения скважин: патент Российской Федерации № 2458962 / Воеводкин В.Л. и др. – Бюл. № 23. – 2012.
12. Армированный цемент композитных материалов с использованием химических волокон с повышенной диспергируемостью: патент США № 20020227 / Lu J Caidian, Merkleu Donald. – Оpubл. 15.06.2010.
13. Способ изготовления армированного цемента из композитных материалов: патент США № 2002112827 / Merkleu Donald, Lu J Caidian. – Оpubл. 28.02.2007.
14. Youpo Su, Jianwei Chen и др. Волокнисто-армированные доски цемента и способы их изготовления: Патент КНР. – Оpubл. 04.07.2012.
15. Армированный цемент на основе смешанного материала: патент Японии № 52682 20120207 / Tanaka Yoshinori, Hashimoto Osamu, Nishi Kazuhiko. – Оpubл. 23.08.2012.
16. Бабков В.В. и др. Фибробетон в производстве железобетонных изделий дорожного и коммунального назначения // Инж. системы. – 2010. – № 3. – С. 14–17.

Ключевые слова: цементный камень, крепь скважины, динамические нагрузки, фибра, армирование, разрушение, деформация, расширение.

СТАЦИОНАРНЫЕ И МОБИЛЬНЫЕ СКЛАДЫ ЦЕМЕНТА:

- стационарные склады (напорные и безнапорные) любого объема
- мобильный склад ЗЦМ (адаптирован для перевозки вертолетной техникой)
- мобильные склады ЦТ-40
- мобильные комплексы МК
- цементовозы ЦТ-25
- автоцементовоз АЦТ-17

**ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА
И КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА СКВАЖИН**

- технологические емкости ПТЕ
- вертикальные и горизонтальные гелевые емкости ВГЕ, ГГЕ
- бункеры для проппанта ПБ
- емкости долива ЕДК
- очистительные емкости ОЕК
- инструментальные мастерские с емкостью долива ПМД
- установка ПОТОК-40
- установки для намотки и размотки кабеля УНРК-2000

ЕМКОСТИ И РЕЗЕРВУАРЫ:

- емкости ЕП, ЕПП
- резервуары РГС, РГСТ, РГД

ВНУТРИСКВАЖИННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ:

- пакеры механические 2ПОМ, 4ПОМ, 5ПОМ и их модификации, 3ПОМ-Ф, 3ПОМ-У, 3ПОМ-П
- пакеры гидравлические 2ПД-ЯГ-2М
- якоря гидравлические 2ЯГМ
- клапаны циркуляционные КЦ
- устройства для очистки забоя скважины УОЗС
- клапаны обратные КО
- разъединители колонны РК

625511, Россия, Тюменская обл.,
Тюменский район, 15-й км Тобольского тракта
Тел./Факс: (3452) 762-319, 762-305, 762-306
marketing@sibneftemash.ru
www.sibneftemash.ru www.grouphms.ru

