

УДК 622. 245.42

Гасумов Рамиз Алиевич, Андрианов Николай Игоревич,
Минченко Юлия Сергеевна

ВЛИЯНИЕ РАСШИРЯЮЩИХ ДОБАВОК НА КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, РАЗВИВАЕМЫЕ ЦЕМЕНТНЫМ РАСТВОРОМ-КАМНЕМ ПРИ ТВЕРДЕНИИ

В статье рассматривается, как проявляющийся при гидратации цемента контракционный эффект отрицательно влияет на изолирующую способность цементного кольца. Для устранения контракции в цемент вводят расширяющие добавки. Рассматривается влияние расширяющихся тампонажных материалов на рост нормальных напряжений между цементным кольцом и контактирующими с ним поверхностями при твердении цементного камня.

Ключевые слова: тампонажный раствор, контактные напряжения, контракция, цементный камень, объемная деформация, крепь скважины.

Gasumov Ramiz A., Andrianov Nikolay I.,
Minchenko Yuliya S.

INFLUENCE OF THE EXPANSION AGENTS ON THE CONTACT STRESSES INDUCED BY THE CEMENT STONE SOLUTION DURING THE HARDENING

In the article, as reflected in the cement hydration contraction effect negatively affects the insulating capacity of the cement ring. The expansion agents are put into the cement for the elimination of the contraction. The authors discuss the influence of the expanding plugging materials on the growth of the normal stresses between the cement sheath and the contact surfaces during the hardening of the cement stone solution.

Keywords: grouting mortar, contact stresses, contraction, cement stone, cubic strain, borehole lining.

Твердение тампонажных растворов в заколонном пространстве скважины сопровождается контракцией – суммарным уменьшением первоначального объема системы «цемент–вода» в процессе гидратации (химического связывания воды в кристаллогидраты). Предельное уменьшение общего объема твердеющей системы для портландцемента при его 100 %-ной гидратации составляет 5–7 % [1]. В результате этого традиционно применяемый тампонажный портландцемент образует цементный камень, не обеспечивающий надежного сцепления с ограничивающими его поверхностями в скважине. Как следствие – резко уменьшается герметичность зацементированного кольцевого пространства, что снижает качество крепи скважины.

Для обеспечения герметичности заколонного пространства в зонах контакта цементный камень-обсадная колонна и цементный камень-порода должно развиваться определенное давление со стороны камня. Поэтому перспективным является использование цементных растворов, способных расширяться в процессе структурообразования и твердения.

Как известно [2, 3, 4], расширение цементного камня после начала схватывания цементного раствора способствует эффективному уплотнению контакта цементного кольца со стенкой скважины и колонной, однако нет достаточно простого метода определения величины контактного давления цементного камня на стенки скважины. Наиболее распространенным способом оценки прочности сцепления цементного камня с ограничивающими ее поверхностями остается выдавливание образцов цементного камня из цилиндрической втулки. При этом способе испытаний могут определяться напряжения сдвига на поверхностях контакта цементного камня с внутренней поверхностью втулки.

Для определения контактных напряжений, развиваемых расширяющимся цементным камнем с охватывающими ее цилиндрическими поверхностями, воспользуемся методикой, представленной в работах [5, 6].

Касательные напряжения сдвига по поверхности кольцевого канала определяются по формуле (1)

$$\tau_{сд} = \frac{P}{F_n} \quad (1)$$

где P – усилие выдавливания, кН;

F_n – площадь контакта цементного кольца, см².

Напряжение сдвига для кольцевого канала (при условии, что оба кольца состоят из одного материала) может быть пересчитано для эквивалентного цилиндрического канала по следующей методике.

Площадь боковой поверхности пологого цилиндра – цементного кольца, рассчитывается по формуле

$$F_H = F_{внеш} + F_{внутр} = \pi \cdot (d_{внеш} + d_{внутр}) \cdot h \quad (2)$$

Эквивалентная площадь поверхности цилиндра, имитирующего площадь контакта цементного кольца, составляет

$$F_H = \pi \cdot D \cdot h \quad (3)$$

где D – диаметр цилиндра, см;

h – высота цилиндра, см.

Таким образом, для имитации кольцевого пространства, эквивалентный диаметр должен удовлетворять равенству

$$D = d_{внеш} + d_{внутр} \quad (4)$$

Из работы [5] максимальное усилие выдавливания (усилие сдвига) определяется по формуле (5)

$$P = K_c \cdot N + \tau_{сц} \cdot F_k \quad (5)$$

где K_c – коэффициент трения скольжения;

N – сила направленная по нормали, Н;

F_k – площадь контакта, см²;

$\tau_{сц}$ – напряжение сцепления при сдвиге цементного камня с поверхностью контакта.

Нормальные напряжения, возникающие при контакте цементного камня с внутренней стенкой кольца и напряжения сдвига определяются делением выражения (5) на площадь контакта F_k . В результате получаем:

$$\tau = K_c \cdot \sigma + \tau_{сц} \quad (6)$$

где σ – нормальные напряжения на поверхности контакта.

При отсутствии расширения нормальных напряжений нет, т. е. $N=0$

$$P = \tau_{сц} \cdot F_k \quad (7)$$

Из этого выражения определяется сила сцепления $\tau_{сц}$ цементного камня с поверхностью кольца. Однако если состав расширяющийся, необходимо производить замер на установке, нивелирующей силы, вызванные расширением, например, разделив кольцевое пространство на две продольные половинки, не связанные друг с другом как это показано на рис. 1.

Зная коэффициент трения цементного камня с металлом (или экспериментально определив его), можно получить нормальные напряжения, возникающие на контакте цементного кольца с охватывающими ее поверхностями.

$$N = \frac{P - \tau_{сц} \cdot F_k}{K_c} \quad (8)$$

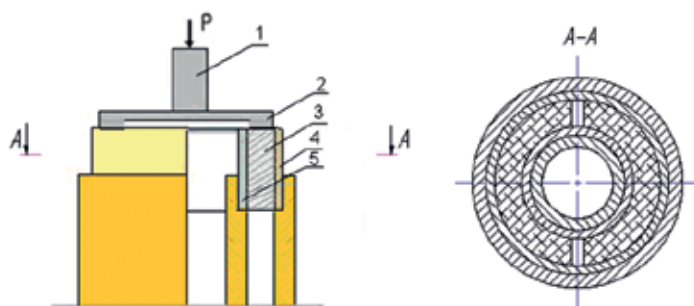


Рис. 1. Схема приспособления для определения сцепления цементного кольца с охватываемыми поверхностями:

1 – пресс; 2 – пуансон; 3 – цементный камень; 4 и 5 – стенки кольца

Или в пересчете на напряжения

$$\sigma = \frac{(\tau - \tau_{сц})}{K_c} \quad (9)$$

Формула напряжения сдвига для тампонажного раствора, заключенного между кольцами из разного материала, вытекает на формулы (5) с учётом того, что стенки кольца сделаны из разных материалов.

$$P = (K_c^{порода} \cdot N + \tau_{сц}^{порода} \cdot \pi \cdot d_{внеш}) \cdot h + (K_c^{сталь} \cdot N + \tau_{сц}^{сталь} \cdot \pi \cdot d_{внутр}) \cdot h \quad (10)$$

или

$$P = N \cdot h \cdot (k_C^{порода} + k_C^{сталь}) + (\tau_{сц}^{порода} \cdot F_{внеш} + \tau_{сц}^{сталь} \cdot F_{внутр}) \quad (11)$$

Величина адгезии $\tau_{сц}$ должна быть получена для каждого материала отдельно. Коэффициенты трения (особенно для керна) рекомендуется получать опытным путём.

По данной методике исследовались четыре состава:

- 1) тампонажный раствор на основе ПЦТ G-CC-1 (В/Ц = 0,44) без химической обработки модифицирующими реагентами – образец 1;
- 2) тампонажный раствор из ПЦТ II -50 (В/Ц = 0,50) без химической обработки модифицирующими реагентами – образец 2;
- 3) специально разработанный расширяющийся тампонажный раствор на основе ПЦТ G-CC-1 (В/С = 0,47) – образец 3;
- 4) безусадочный тампонажный раствор на основе ПЦТ II-50 (В/С = 0,50) – образец 4.

Тампонажные растворы заливались в цилиндры, имитирующие затрубное пространство, и с течением времени затвердевания от 1 до 10 дней измерялись необходимые параметры (рис. 2).

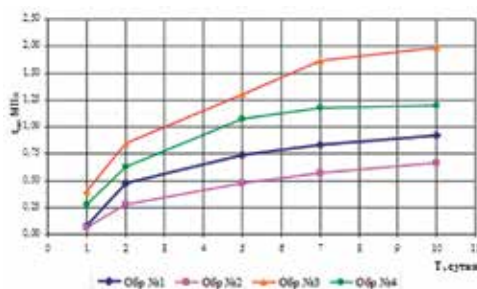


Рис. 2. Влияние времени ОЗЦ на величину напряжения сдвига при контакте цементного камня с металлом

Из рис. 2 видно, что образцы 1 и 2 необработанных тампонажных растворов имеют слабое напряжения сдвига цементного камня с охватывающей поверхностью в отличие от образцов 3 и 4, полученных из тампонажных растворов, включающих расширяющие добавки (РД). При сравнении действия РД в тампонажных растворах видно, что наиболее эффективно она работает в тампонажном растворе из ПЦТ I-G-CC-1, что, вероятно, обусловлено различным химико-минералогическим составом цемента.

Учитывая содержание 9 % опоки в ПЦТ II-50 по сравнению с бездобавочным ПЦТ I-G-CC-1, можно предположить, что тампонажный раствор из ПЦТ II-50 менее реакционно-способен к химическому взаимодействию с РД с образованием продуктов гидратации большего, чем у исходных минеральных соединений объема, как это происходит в тампонажном растворе на основе ПЦТ I-G-CC-1.

Показатели разработанного нами расширяющегося тампонажного раствора на основе ПЦТ I-G-CC-1, применяемого на скважинах Невского ПХГ, приведены в табл. и на рис. 3, 4.

Таблица

Параметры тампонажного раствора (T=23 °C)

№ п.п.	Параметры тампонажного раствора						
	Содержание РД % от массы цемента	В/С	Плотность, кг/см ³	Растекаемость, см	Пластическая вязкость, мПа·с	ДНС, дПа	Водоотстой, мл
0	-	0,47	1910	23,0	31	183	5,0
1	1	0,47	1910	23,0	42	231	3,5
2	2	0,47	1910	22,0	45	238	3,0
3	3	0,47	1910	21,0	50	250	2,0
4	4	0,47	1910	21,0	58	269	1,5
5	5	0,47	1910	20,0	71	292	1,0
6	6	0,47	1910	19,5	85	301	1,0
7	7	0,47	1910	19,0	98	315	1,0
8	8	0,47	1910	18,0	100	397	0,5
9	9	0,47	1910	18,0	115	432	0,5
10	10	0,47	1910	16,0	122	489	0
11	11	0,47	1910	16,0	141	526	0

Цементный камень без РД является усадочным, при вводе РД в количестве 0,5-2,0 % цементный камень незначительно меняется в объеме и является оптимальным для цементировки межколонного пространства. Заметное расширение начинается при увеличении содержания добавки в сухой смеси более 5 % (рис. 3), однако вместе с этим повышается вязкость тампонажного раствора и, как следствие, ухудшается его прокачиваемость при цементировании обсадной колонны. Поэтому в открытом стволе скважины рекомендуется добавлять РД в количестве 3–5 % от массы цемента.

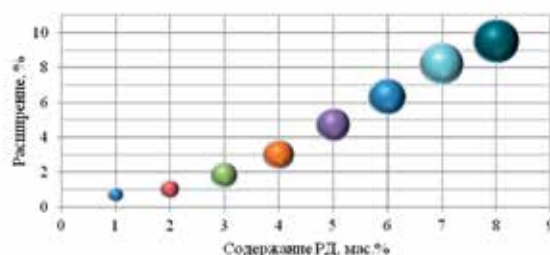


Рис. 3. Объемное изменение цементного теста в зависимости от содержания РД

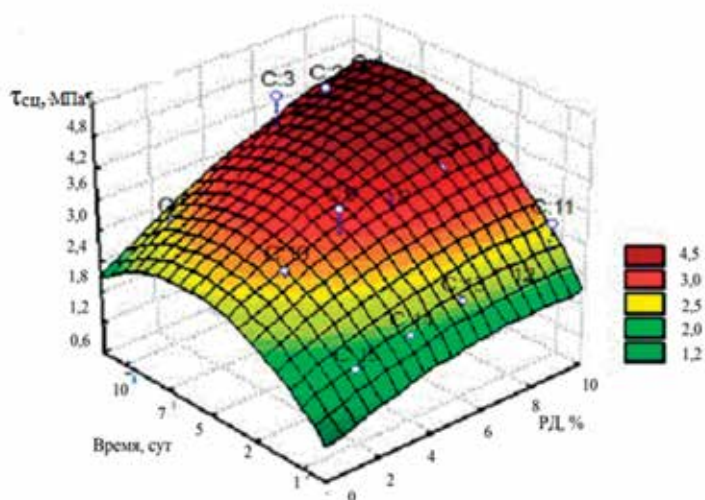


Рис. 4. Зависимость напряжения сдвига цементного камня от содержания РД

При анализе изменения напряжения сдвига цементного камня (рис. 4) мы наблюдаем, что с увеличением времени его твердения и количества РД напряжение сдвига возрастает. Величина контактного напряжения с охватываемыми поверхностями становится ощутимой уже при введении в сухую смесь 2 % РД. При 4 % РД на основе оксида кальция величина напряжения сдвига составляет 2,5 МПа, при увеличении концентрации РД до 10 % величина сдвига цементного камня с поверхности металла достигает 4,1 МПа.

Разработанный эффективный расширяющийся состав тампонажного раствора на основе портландцемента ПЦТ I-G-СС-1 может быть использован в буровой практике, что позволит улучшить качество образующегося в затрубном пространстве скважин цементного кольца, снизить вероятность возникновения флюидопроводящих каналов в зонах контакта с ограничивающей поверхностью и появления межколонных давлений.

Используя приведённую в статье методику можно рассчитать давление сдвига цементного камня, как с поверхности металла, так и с поверхности горной породы, зная коэффициент трения скольжения.

Литература

1. Бутт Ю. М., Волконский Б. В., Егоров Г. Б. Справочник по химии цемента. Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1980. 224 с.
2. Перейма А. А., Трусов С. Г., Минченко Ю. С. О влиянии химической обработки тампонажных растворов на эффективность действия расширяющих добавок // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2011. № 5. С. 27–30.
3. Гасумов Р. А., Мосиенко В. Г. Расширяющийся тампонажный цемент // Геология, бурение и разработка газовых и газоконденсатных месторождений и ПХГ: сб. научных трудов СевКавНИПИгаз. Ставрополь. 2002. С. 203–208.
4. Гасумов Р. А., Перейма А. А. Повышение качества крепления скважин // Газовая промышленность. № 5. 2001. С. 44–46.
5. Газизов Х. В., Газизов Ш. Х. Методика оценки нормальных напряжений развиваемых расширяющимся цементным камнем // Oil and Gaz Eurasia. 2011. № 2. С. 50–52.
6. Мильштейн В. М. Цементирование буровых скважин. Краснодар, 2003. С. 275