



УДК 622.245.422

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЯ МАССЫ ТВЕРДОГО ТЕЛА В ФОРМИРУЮЩЕМСЯ ЦЕМЕНТНОМ КАМНЕ

STUDYING THE CHARACTER OF CHANGE IN THE MASS OF A SOLID BODY IN THE FORMING CEMENT STONE

Шуть Константин Федорович

кандидат технических наук,
доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин,
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
cemlab@yandex.ru

Храбров Вадим Александрович

аспирант, ассистент
кафедры бурения нефтяных и газовых скважин,
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
iprachev@ncfu.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию причин изменения массы твердого тела в формирующемся цементном камне с целью прогнозирования и учета дополнительных растягивающих нагрузок, действующих на обсадную колонну в период ожидания затвердевания цемента (ОЗЦ). Дан анализ научно-технической информации, касающейся взаимодействия формирующегося цементного камня с обсадной колонной и приведены результаты лабораторных испытаний влияния различных факторов на величину сцепления различных материалов с формирующимся цементным камнем на этапе ОЗЦ.

Ключевые слова: тампонажный раствор, крепление скважин, выталкивающая сила, сцепление, гидростатическое взвешивание.

Shut Konstantin Fedorovich

PhD in Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of
Drilling Oil and Gas Wells,
National University of Oil and Gas
«Gubkin University»
cemlab@yandex.ru

Khrabrov Vadim Alexandrovich

Postgraduate student, Assistant Professor,
Department of Oil and Gas Well Drilling,
National University of Oil and Gas
«Gubkin University»
iprachev@ncfu.ru

Annotation. The article is devoted to the study of the reasons for the change in the mass of a solid in the forming cement stone in order to predict and take into account additional tensile loads acting on the casing during the waiting on cement (woc). The analysis of scientific and technical information concerning the interaction of the forming cement stone with the casing string is given and the results of laboratory tests of the influence of various factors on the value of adhesion of various materials to the forming cement stone at the stage of waiting on cement are given.

Keywords: cementing slurry, casing, buoyancy force, adhesion, hydrostatic weighing.

Введение

Во время ожидания затвердевания цемента (ОЗЦ) наблюдается увеличение веса обсадной колонны (ОК), которое фиксируется по величине нагрузки на крюке. Данное явление ряд авторов связывают с температурными колебаниями по глубине скважины [1–3], с оседанием твердой фазы цементного раствора [4, 5], с уменьшением величины выталкивающей силы при гидратации вяжущего материала [6].

В работе [4] по результатам промысловых испытаний показано, что для ОК диаметром 146,1 мм длиной 1000 метров увеличение массы от зависания скелета цементного раствора составило до 27,2 % (от массы колонны в воздухе), от изменения давления при гидратации вяжущего материала до 50,4 % (цементный раствор плотностью 1820 кг / м^3 , плотность жидкости затворения – 1000 кг / м^3).

В работе [5] авторы исследовали характер изменения веса тонкой пластины в период гидратации вяжущего материала. Установлено, что на характер и интенсивность изменения массы пластины влияют: величина зазора от поверхности пластины до стенки ограничивающего сосуда, ширина пластины. При увеличении зазора и ширины пластины фиксируется увеличение величины прироста массы пластины при твердении формирующегося цементного камня. Изменение массы пластины авторы связывают с трением и сцеплением сползающего цементного скелета, что приводит к возникновению дополнительных напряжений растяжения.

Для определения характера изменения выталкивающей силы в цементном растворе в работе [7] предложено сообщать на стержень вибрацию с амплитудой, превышающей амплитуду собственных колебаний стержня, что позволяет устранить влияния трения твердой фазы суспензии о стержень. В работе [6] авторы приходят к выводу о том, что суммарное увеличение нагрузки на стержень, погруженный в цементную суспензию, связано как с зависанием твердой фазы суспензии, вышедшей из взвешенного состояния, так и со снижением выталкивающей силы при гидратации вяжущего мате-



риала. Также в работе показано, что на величину увеличения нагрузки на погруженный стержень оказывает влияние величина коэффициента аномальности пластового давления. При увеличении пластового давления наблюдается уменьшение прироста массы стержня при твердении формирующегося цементного теста-камня, что объясняется замедлением снижения выталкивающей силы.

В работе [8] авторами предпринята попытка связать изменение массы стержня с силой трения, возникающей при химической усадке (контракции) формирующегося цементного камня. Авторы оценивали изменение массы стального стержня диаметром 0,635 см и длиной от 30 до 90 см. При твердении портландцемента класса ПЦТ-I-N (плотность раствора 1860 кг / м³) авторами не было зафиксировано увеличение массы стального стержня. Авторы пришли к выводу о том, что контракция происходит до наступления момента активного роста статического напряжения сдвига (СНС) формирующегося цементного теста.

Понимание природы явления изменения массы твердого тела в формирующемся цементном камне важно с целью прогнозирования и учета дополнительных растягивающих нагрузок, действующих на ОК в период ОЗЦ. Кроме того, изучение данного явления позволит найти решения по повышению сцепления формирующегося цементного теста-камня с поверхностью твердого тела.

Материалы и методы исследования

Изучение характера изменения массы стержня в твердеющем цементном растворе осуществлялось с помощью установки, представленной на рисунке 1.

Цементный раствор готовится в соответствии со стандартом ISO 10426-2:2003 (пункт 5). После приготовления цементный раствор заливается в рабочий цилиндр атмосферного консистометра. В течении фиксированного времени цементный раствор кондиционируется при циркуляционной температуре. Перед каждым испытанием поверхности стержня и стакана чистятся в ультразвуковой ванне и обезжириваются. С помощью фиксатора (2) стержень (3) жестко фиксируют на стойке весов, через которую нагрузка со стержня передается на весы (6) и затем на блок сбора данных (1). После кондиционирования цементный раствор переливают в чашу (4) термостакана (5), который предварительно прогревают до заданной статической температуры. Запускают программное обеспечение для автоматического сбора данных. Испытание прекращают после достижения момента времени, при котором наблюдается выполаживание кривой изменения массы стержня (соответствует концу схватывания формирующегося цементного камня).

По результатам лабораторных испытаний строятся кривые изменения массы стержня во времени и изменения скорости роста массы стержня во времени. На графики изменения массы стержня и скорости роста массы стержня также накладывалась кривая роста СНС формирующегося цементного теста, снятая неразрушающим методом с помощью ультразвукового анализатора цемента.

Выбранная методика и схема установки позволяют контролировать следующие факторы:

- температурный режим (циркуляционная и статическая температура проведения испытаний);
- время кондиционирования;
- способ обработки поверхности стержня и емкости с исследуемым цементным раствором.

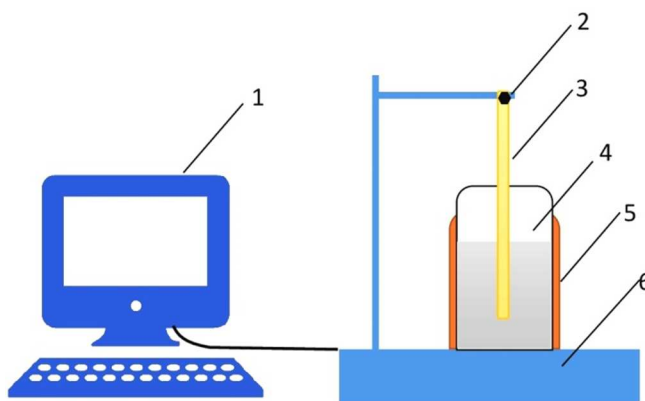


Рисунок 1 – Схема весов в сборе для определения изменения веса твердого тела, погруженного в цементную суспензию, методом гидростатического взвешивания: 1 – блок сбора данных, 2 – фиксатор стержня, 3 – стержень, 4 – емкость с исследуемым цементным раствором, 5 – термостакан, 6- лабораторные весы с комплектом для измерения массы подвешенного твердого тела

В качестве исследуемых материалов использовались: портландцемент ПЦТ-I-G СС1 (вяжущий материал), СаСl₂ (ускоритель схватывания). Применялась следующая базовая рецептура цементного раствора плотностью 1900 кг / м³: 100 % ПЦТ-I-G СС1+3 %(по весу цемента) СаСl₂.



В качестве материала стержня было решено использовать латунь из-за отсутствия влияния на кинетику гидратации вяжущего материала (диаметр стержня $d = 10$ мм, стандартная глубина погружения $L_{\text{погр}} = 39$ мм, масса стержня в воздухе $M_{\text{в}} = 67,4$ г).

Для обработки поверхности стержня и стакана применялись: гидрофобизирующая жидкость (ГКЖ), смачиватель (ОП-7), кварцевый песок (300 меш).

Результаты и обсуждение

На рисунках 1–2 представлены кривые изменения массы стержня и скорости роста массы стержня, полученные для цементного раствора базовой рецептуры плотностью 1900 кг/м^3 : 100 % ПЦТ-I-G+3 % CaCl_2 (кондиционирование цементного раствора в течении 40 минут при циркуляционной температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$, статическая температура $35 \text{ }^\circ\text{C}$).

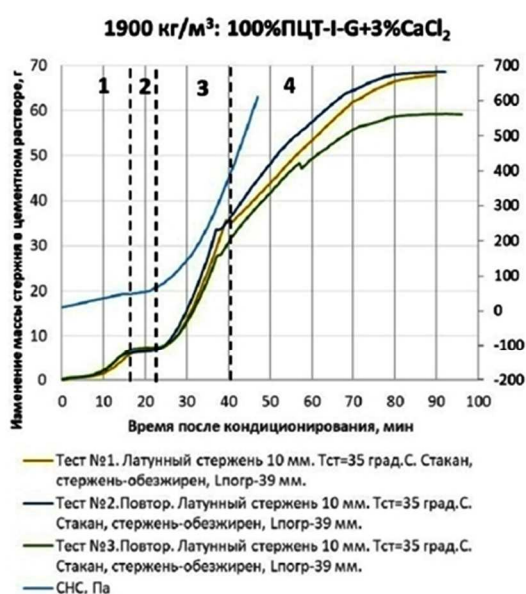


Рисунок 2 – Изменение массы стержня в цементной суспензии (тест на повторяемость)

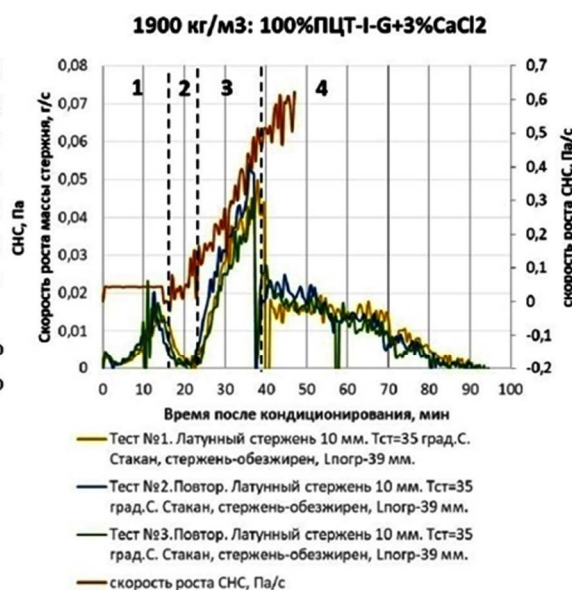


Рисунок 3 – Изменение скорости роста массы стержня в цементной суспензии (тест на повторяемость)

Результаты трех испытаний показали хорошую повторяемость как по характеру изменения массы стержня, так и по скорости роста массы стержня. При изучении влияния факторов на характер и интенсивность изменения массы стержня в цементной суспензии было решено разделить период испытаний на характерные интервалы (1–4 на графиках):

- интервал 1 – начальный рост массы стержня;
- интервал 2 – стабилизация массы стержня;
- интервал 3 – активный рост массы стержня;
- интервал 4 – снижение скорости увеличения массы стержня.

Выполаживание кривой изменения массы стержня.

Была проведена оценка влияния глубины погружения ($L_{\text{погр}}$) латунного стержня (площади контакта боковой поверхности стержня с цементным раствором ($S_{\text{к}}$) на характер и интенсивность изменения массы стержня. На рисунках 3–4 представлены кривые изменения массы стержня и скорости роста массы стержня, полученные для цементного раствора базовой рецептуры (кондиционирование цементного раствора в течении 40 минут при циркуляционной температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$, статическая температура $25 \text{ }^\circ\text{C}$).

Глубина погружения стержня составляла:

- тест № 4 $L_{\text{погр}} = 15$ мм ($S_{\text{к}} = 471 \text{ мм}^2$);
- тест № 5 $L_{\text{погр}} = 26,5$ мм ($S_{\text{к}} = 832,1 \text{ мм}^2$);
- тест № 6 $L_{\text{погр}} = 39$ мм ($S_{\text{к}} = 1224,6 \text{ мм}^2$);
- тест № 7 $L_{\text{погр}} = 60$ мм ($S_{\text{к}} = 1884 \text{ мм}^2$).

Из представленных графиков видно, что с увеличением площади контакта поверхности стержня с цементным раствором наблюдается увеличение величины прироста и скорости роста массы стержня на первом интервале и снижение скорости роста массы стержня на третьем интервале. Можно отметить, что площадь контакта боковой поверхности стержня с цементным раствором слабо повлияла на характер изменения массы стержня на четвертом интервале. Продолжительность интервалов также не изменилась.



Была проведена оценка влияния обработки поверхности стержня твердыми частицами (тест № 8 – песок 300 меш), смачивателем (тест № 9 – ОП-7), гидрофобизирующей жидкостью (тест № 10 – ГКЖ). Результаты испытаний для цементного раствора базовой рецептуры представлены на рисунках 6–7 (кондиционирование цементного раствора в течении 40 минут при циркуляционной температуре 25 °С, статическая температура 35 °С).

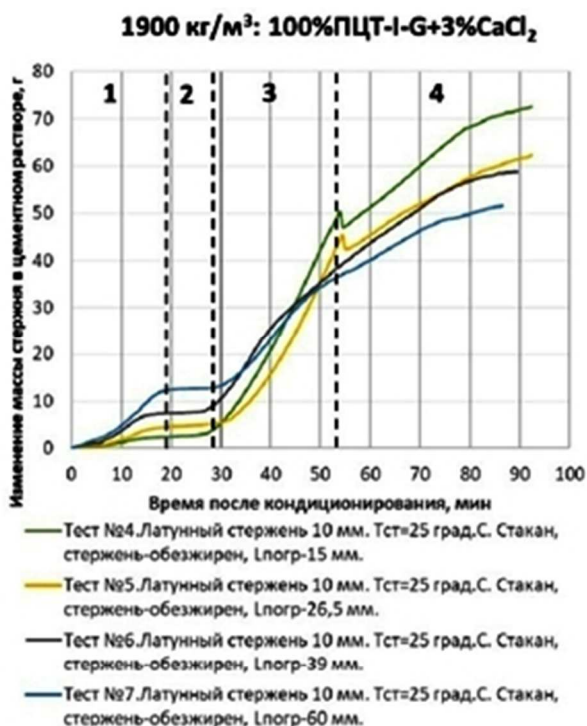


Рисунок 4 – Влияние площади контакта на изменение массы стержня в цементной суспензии

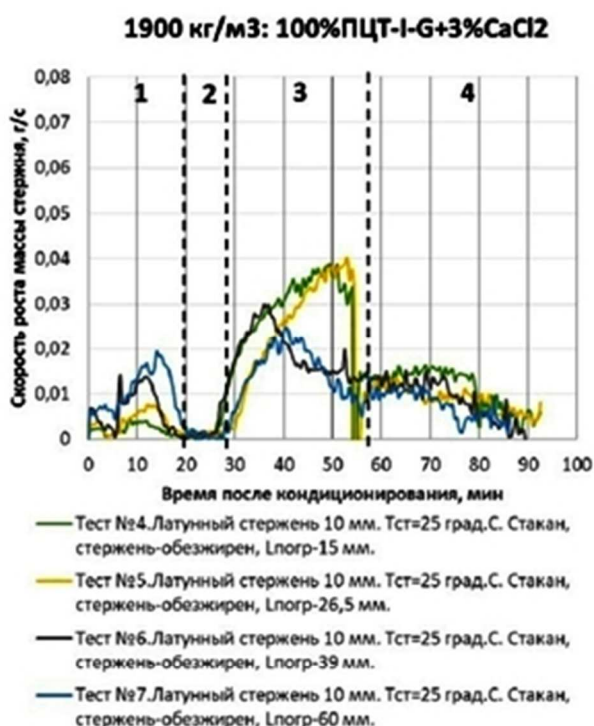


Рисунок 5 – Влияние площади контакта на изменение скорости роста массы стержня в цементной суспензии

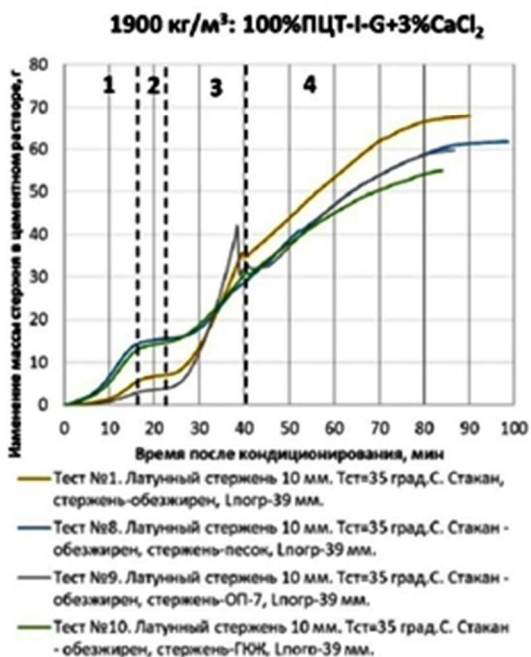


Рисунок 6 – Влияние обработки поверхности стержня на изменение массы стержня в цементной суспензии

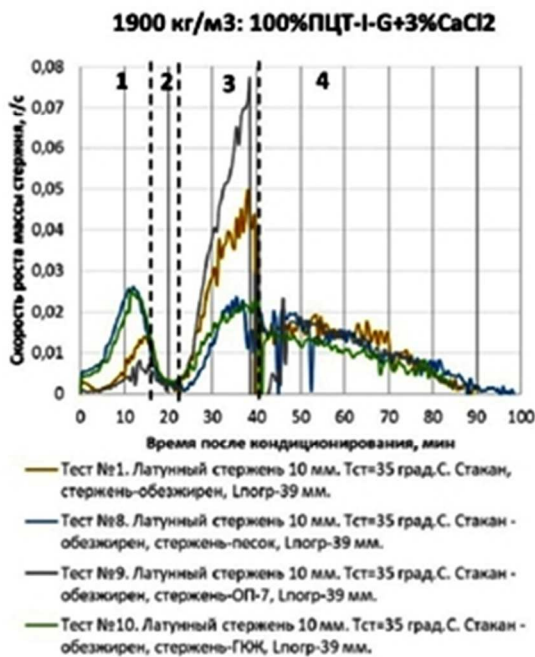


Рисунок 7 – Влияние обработки поверхности стержня на изменение скорости роста массы стержня в цементной суспензии



При нанесении на поверхность стержня песка или пленки ГЮЖ отмечено увеличение величины прироста и скорости роста массы стержня на первом интервале и снижение скорости роста массы стержня на третьем интервале. Обратная ситуация наблюдается при нанесении на поверхность стержня смачивателя ОП-7 (снижение величины прироста и скорости роста массы стержня на первом интервале и увеличение скорости роста массы стержня на третьем интервале). При этом, как и в случае изменения площади контакта стержня с цементной суспензией, обработка поверхности стержня не повлияла на характер изменения массы стержня на четвертом интервале.

Также была проведена оценка влияния обработки поверхности стакана твердыми частицами (тест № 11 – песок 300 меш), гидрофобизирующей жидкостью (тест № 12 – ГЮЖ), смачивателем (тест № 13 – ОП-7). Результаты испытаний для цементного раствора базовой рецептуры представлены на рисунках 8–9 (кондиционирование цементного раствора в течении 40 минут при циркуляционной температуре 25 °С, статическая температура 35 °С).

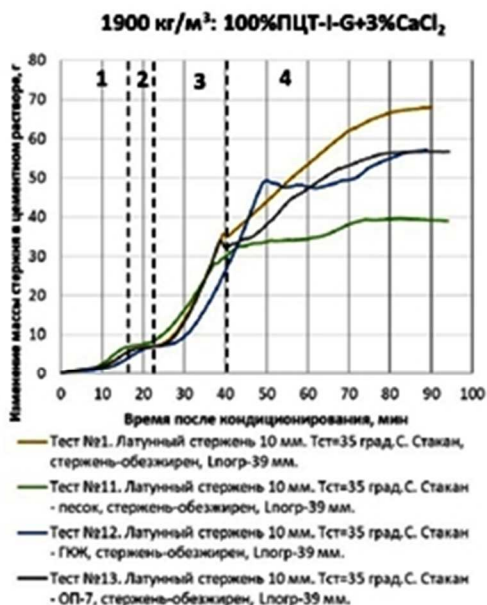


Рисунок 8 – Влияние обработки поверхности стакана на изменение массы стержня в цементной суспензии

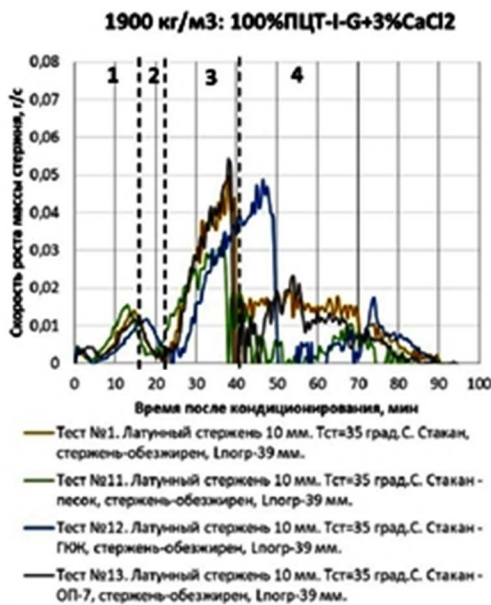


Рисунок 9 – Влияние обработки поверхности стакана на изменение скорости роста массы стержня в цементной суспензии

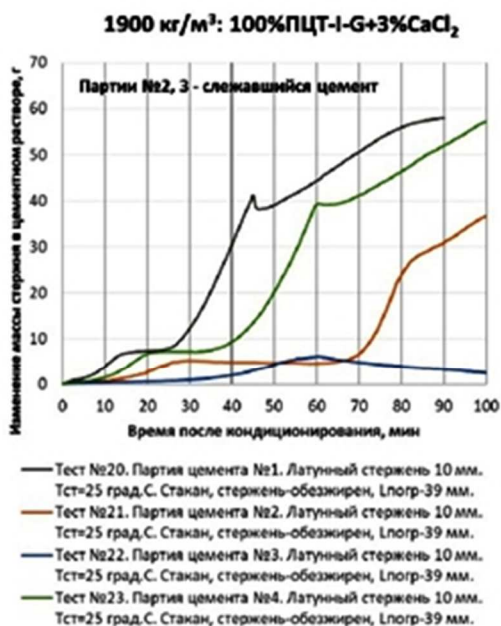


Рисунок 10 – Влияние качества цемента на изменение массы стержня в цементной суспензии

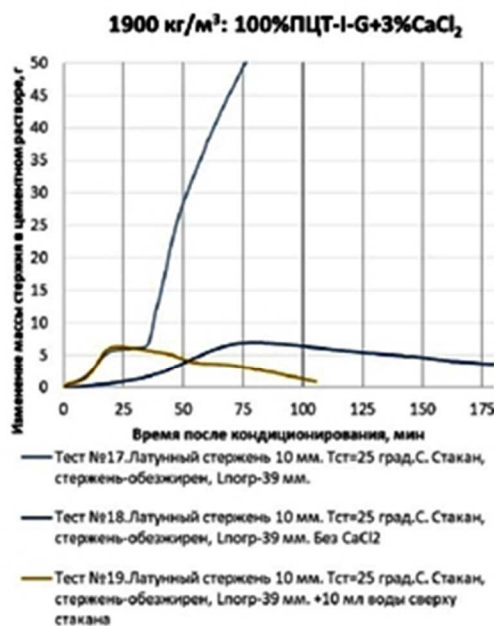


Рисунок 11 – Влияние наличия свободной воды (водоотделения) на изменение массы стержня в цементной суспензии



При нанесении на поверхность стакана песка или пленки ГКЖ отмечено существенное снижение скорости роста массы стержня на четвертом интервале. При этом характер и интенсивность изменения массы стержня и скорости роста массы стержня в интервале периодов 1–3 изменились слабо.

На характер и интенсивность изменения массы стержня также влияет качество сухого цемента. На рисунке 10 представлены кривые изменения массы стержня для четырех партий цемента. Необходимо отметить, что номерами партий 2 (тест № 21) и 3 (тест № 22) отмечен слежавшийся цемент, при применении которого наблюдалось расслоение растворов $1900 \text{ кг} / \text{м}^3$: $100\% \text{ПЦТ-I-G} + 3\% \text{CaCl}_2$.

Для подтверждения гипотезы, связанной с тем, что на характер изменения массы стержня может влиять водоотделение цементного раствора, были проведены следующие тесты (рис. 11):

– тест № 17 – цементный раствор плотностью $1900 \text{ кг} / \text{м}^3$: $100\% \text{ПЦТ-I-G} + 3\% \text{CaCl}_2$ (базовые условия испытания: кондиционирование цементного раствора в течении 40 минут при циркуляционной температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$, статическая температура $25 \text{ }^\circ\text{C}$, водоотделение $\text{FW} = 0 \text{ мл}$);

– тест № 18 – цементный раствор без применения ускорителя CaCl_2 (базовые условия испытания, водоотделение $\text{FW} = 6,5 \text{ мл}$);

– тест № 19 – цементный раствор плотностью $1900 \text{ кг} / \text{м}^3$: $100\% \text{ПЦТ-I-G} + 3\% \text{CaCl}_2$ (базовые условия испытаний, сверху рабочего стакана добавлено 10 мл воды).

При наличии свободной воды (водоотделения) отмечено отсутствие прироста массы стержня в промежутке интервалов 3 и 4, что может говорить о слабом контакте формирующегося цементного теста-камня с поверхностью стержня или об отсутствии контакта. При этом наличие свободной жидкости сверху стакана не повлияло на характер изменения массы стержня на первом интервале (сравнение тестов 17 и 19). При отсутствии ускорителя в базовой рецептуре цементного раствора отмечено увеличение продолжительности первого интервала (тест № 18). При этом величина прироста массы стержня в конце первого интервала не изменилась.

Заключение

Проведенные испытания позволяют сделать следующие предположения о природе изменения массы стержня, погруженного в цементную суспензию.

Интервал 1 (начальный рост массы стержня) связан с трением частиц цемента при уменьшении внешнего объема суспензии при гидратации вяжущего материала. Величина прироста массы по результатам проведенных испытаний зависит от площади контакта и от характера обработки поверхности стержня (рис. 4, 6).

Интервал 2 (стабилизация массы стержня) связан с прекращением изменения внешнего объема суспензии в связи с началом периода активного роста СНС формирующегося цементного геля (рис. 2).

Интервал 3 (активный рост массы стержня) связан с контракционным эффектом (с появлением в межзерновых пустотах вакуума), что приводит к втягиванию стержня в случае седиментационно устойчивого цементного раствора и к всасыванию свободной жидкости по поверхности стержня в случае расслоения цементного раствора (рис. 11). Интервал 3 может характеризовать силу сцепления стержня с формирующимся цементным гелем-тестом (при лучшем контакте стержня с цементным гелем скорость роста массы и интенсивность роста массы снижается (рис. 4–7). Величина скорости роста массы стержня по результатам проведенных испытаний зависит от площади контакта и от характера обработки поверхности стержня. Обращает на себя внимание, что при большем приросте массы стержня в период интервала № 1, наблюдается сокращение скорости роста массы стержня в период интервала №3 (рис. 5, 7).

Интервал 4 (снижение скорости увеличения массы стержня, выполаживание кривой роста массы стержня) предположительно связан с продолжающимся контракционным эффектом, а также с отслоением формирующегося цементного теста от внешней ограничивающей поверхности стакана из-за стяжения частиц цемента в зону наибольшего развития вакуума, что может приводить к разгрузке формирующегося цементного камня на стержень. Величина прироста массы и скорость роста массы стержня зависит от характера обработки поверхности стакана (рис. 8, 9). Интервал 4 может характеризовать силу сцепления камня со стенкой вмещающего стакана.

В работе показано, что при проведении испытаний по изучению характера и интенсивности изменения массы твердого тела в формирующемся цементном камне необходимо контролировать и фиксировать следующие факторы: площадь контакта твердого тела с цементной суспензией, водоотделение цементной суспензии, качество сухого цементного порошка, характер обработки поверхности стержня и стакана, температурный режим.

Можно отметить, что при обработке поверхности стержня гидрофобизирующей жидкостью (ГКЖ) величина прироста и скорость изменения массы стержня сопоставимы со случаем нанесения на поверхность стержня кварцевого песка (рис. 6, кривые 8 и 10). Необходимо проведение дополнительных испытаний, направленных на сопоставление характера изменения массы твердого тела с силой сцепления твердого тела с формирующимся цементным камнем.



Авторы выражают благодарность профессору кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Подгорнову Валерию Михайловичу за плодотворное обсуждение методики и результатов экспериментальных исследований.

Литература:

1. О возможности дополнительных осевых напряжений в колоннах обсадных труб в период цементирования / А.И. Булатов [и др.] // Тр. КФ ВНИИНефть «Бурение и разработка нефтяных и газовых месторождений». – М. : Недра, 1966. – № 15. – С. 52–55.
2. Козодой А.К. К вопросу определения гидродинамических давлений в скважине // Труды «Бурение глубоких скважин в нижнем Поволжье». – Волгоград : ВНИИНГП, 1969. – № 15. – С. 15–19.
3. Красюк А.Л. О действующих нагрузках на обсадные колонны, возникающие вследствие температурных напряжений и давлений. – М. : Нефтяное хозяйство, 1965. – № 8. – С. 39–42.
4. Грачев В.В., Леонов Е.Г., Малеванский В.Д. Об увеличении веса обсадной колонны в период ОЗЦ // Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. – М. : ВНИИЭГазпром, 1969. – № 9. – С. 31–34.
5. Грачев В.В. Исследование и разработка методов повышения герметичности заколонного пространства скважин : дис. ... к.т.н. Спец. 05.15.10. – М., 1981. – 267 с.
6. Геранин М.П. Исследование тампонирующей способности цементных растворов : дис. ... к.т.н. Спец. 05.15.10. – М., 1976. – 264 с.
7. Соловьев Е.М., Геранин М.П. А.с. СССР № 336596. Способ определения величины выталкивающей силы седиментационно неустойчивых концентрированных цементных и иных суспензий. – 1972.
8. Nishikawa S., Wojtanowicz A.K. Transient Pressure Unloading. A Model of Hydrostatic Pressure Loss in Wells after Cement Placement // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2002. – P. 1–10. doi:10.2118/77754-ms.

References:

1. On the possibility of additional axial stresses in casing strings during cementing / A.I. Bulatov [et al] // Proc. KF VNIINeft «Drilling and development of oil and gas fields». – M. : Nedra, 1966. – № 15. – P. 52–55.
2. Kozodoy A.K. To a question of definition of hydrodynamic pressures in a well // Works «Drilling of deep wells in the lower Volga region». – Volgograd : VNIIGP, 1969. – № 15. – P. 15–19.
3. Krasiuk A.L. About the action loads on the casing strings, arising owing to temperature stresses and pressures. – M. : Oil Economy, 1965. – № 8. – P. 39–42.
4. Grachev V.V., Leonov E.G., Malevanskiy V.D. On increase in casing string weight during OZC // Development and Exploitation of Gas and Gas-Condensate Fields. – M. : VNIIEGazprom, 1969. – № 9. – P. 31–34.
5. Grachev V.V.. Research and Development of Methods to Increase Tightness of Boreholes Borehole Containment : doctoral thesis. Sci. 05.15.10. – M., 1981. – 267 p.
6. Geranin M.P. Research of plugging ability of the cement mortars : a Sci. of Technical Science, Speciality 05.15.10. – M., 1976. – 264 p.
7. Solov'ev E.M., Geranin M.P. A.s. USSR № 336596. Method of Determination of Magnitude of Ejection Force of Sedimentary Unstable Concentrated Cementary or Other Suspensions. – 1972.
8. Nishikawa S., Wojtanowicz A.K. Transient Pressure Unloading. A Model of Hydrostatic Pressure Loss in Wells after Cement Placement // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2002. – P. 1–10. doi:10.2118/77754-ms.