

Интернет-журнал «Мир науки» ISSN 2309-4265 <http://mir-nauki.com/>

Выпуск 2 - 2015 апрель — июнь <http://mir-nauki.com/issue-2-2015.html>

URL статьи: <http://mir-nauki.com/PDF/17TMN215.pdf>

УДК 622.276.72

Шангараева Лилия Альбертовна

ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

Россия, Санкт-Петербург

Ассистент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений

Кандидат технических наук

E-mail: l.shangaraeva@mail.ru

Султанова Дина Анасовна

ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

Россия, Санкт-Петербург

Аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений

E-mail: dasultanova@gmail.com

Изучение механизма образования отложений солей на глубинно-насосном оборудовании при эксплуатации многопластовых скважин

Аннотация. Проблема отложений солей является постоянным спутником эксплуатации скважинного и подземного оборудования, как на начальных, так и на завершающих стадиях разработки нефтяных месторождений. В работе представлены результаты лабораторных экспериментов по исследованию условий отложения сульфата бария в скважинном оборудовании. На основании полученных зависимостей была разработана методика расчета времени окончания реакции образования сульфата бария по результатам анализа пластовых вод.

Ключевые слова: солеотложения; сульфат бария; индукционный период; осаждение; пересыщение; смешение вод; кристаллы-зародыши; концентрация смешения; сульфат-ионы; ионы бария.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Шангараева Л.А., Султанова Д.А. Изучение механизма образования отложений солей на глубинно-насосном оборудовании при эксплуатации многопластовых скважин // Интернет-журнал «Мир науки» 2015 №2 <http://mir-nauki.com/PDF/17TMN215.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

Одной из важнейших задач, стоящих перед нефтяниками страны, является совершенствование процессов добычи нефти в осложненных геолого-физических и технологических условиях. Это связано с вступлением большей части высокопродуктивных нефтяных месторождений страны в позднюю стадию разработки и ростом доли трудноизвлекаемых запасов в их общем объеме.

При описании и прогнозировании процесса образования сульфата бария обычно используются только химические (концентрация ионов и ионная сила раствора) и термодинамические (давление и температура) характеристики. Согласно [1] уравнение прогноза образования соли - сульфата бария, по SI – критерию – следующее:

$$SI = \log [Ba^{2+}] \cdot [SO_4^{2-}] - 4,063 \mu^{0,5} + 2,787 \mu - 3,33 \cdot 10^{-3} T \mu^{0,5} - 7,561 \cdot 10^{-3} T + 10^{-3} T + 3,775 \cdot 10^{-5} T^2 - 7,709 \cdot 10^{-3} P + 10,$$

где P – давление, МПа

T – температура, °C

μ - ионная сила раствора

$[Ba^{2+}] \cdot [SO_4^{2-}]$ – молярные концентрации

При $SI > 0$ – выпадение солей, при $SI < 0$ осадок не образуется.

Очевидно, что данное уравнение прогноза описывает случай образования сульфата бария для однопластовой скважины, при значительном изменении термобарических условий, кроме того уравнение не пригодно при использовании результатов анализа поверхностных проб, отобранных с устья скважины, т.к. не учитывает сульфат бария уже отложившийся на ГНО и находящийся в виде ТВЧ (твердых взвешенных частиц).

Анализируя выше представленное уравнение можно сделать вывод – при эксплуатации месторождения с низкими давлениями (20 – 30 МПа) и с невысокой температурой пластов (25-27 °C) вклад термодинамических параметров незначительный - не более 3 %, причем вклад давления вообще минимален – менее 1 %. Эта величина меньше чем точность определения химических параметров (ионной силы и молярной концентрации) погрешность определения которых значительно больше.

Следует отметить, что при эксплуатации ЭЦН происходит нагрев жидкости при прохождении ее через погружной электродвигатель и сам насос [2], т.е. так как нагрев приводит к росту растворимости сульфата бария, следовательно, должен снижаться риск отложения на рабочих колесах ЭЦН. На практике такого не наблюдается.

Если все - таки предположить, что отложение сульфата бария происходит за счет закрепления твердых взвешенных частиц (ТВЧ) на микронеровностях рабочих колес, и в дальнейшем происходит их рост из пресыщенного раствора (за счет изменения термодинамических параметров), то очевидно при переводе ЭЦН с чугунными колесами на ЭЦН с пластиковыми должно наблюдаться увеличение межремонтного периода работы (МРП) на скважинах осложненных солями сульфата бария. К сожалению, на практике такого не наблюдается или рост МРП незначительный.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что основная причина отложения сульфата бария на ГНО – смешение вод разных типов (сульфатной и баритовой) в результате эксплуатации многопластовых скважин, однопластовых с заколонными перетоками или скважин с нарушениями сплошности эксплуатационной колонны.

Рассмотрим некоторые теоретические аспекты механизма образования твердой фазы – сложного процесса, состоящего из нескольких стадий [3, 4].

1. Дегидратация ионов, образующих осадок. Ионы в растворе гидратированы, поэтому ионы перед образованием кристалла должны утратить гидратную воду.
2. Образование первичных центров кристаллизации – кристаллов-зародышей. Два иона противоположного знака, объединяясь в молекулу, не образуют еще кристаллическую форму. Образование первичного кристалла сульфата бария проходит через ряд промежуточных стадий.

$Ba^{2+} + SO_4^{2-} \leftrightarrow Ba^{2+}SO_4^{2-}$ - образование ионной пары

$Ba^{2+}SO_4^{2-} + SO_4^{2-}$ (или Ba^{2+}) $\leftrightarrow Ba(SO_4)_2^{2-}$ [$Ba_2(SO_4)^{2+}$]

$Ba(SO_4)_2^{2-} + Ba^{2+} \leftrightarrow (Ba^{2+}SO_4^{2-})_2$ и т.д. $(Ba^{2+}SO_4^{2-})_3$; $(Ba^{2+}SO_4^{2-})_4$.

Это так называемый индукционный период.

3. Рост первичных центров кристаллизации за счет осаждения на них все большего количества ионов, в результате чего образуются кристаллы большего размера, объединяющиеся между собой в более крупные агрегаты, не способные, однако, еще выделиться из раствора в виде осадка. Это – коллоидная стадия образования нерастворимого соединения.
4. Образование в течение некоторого времени в растворе настолько крупных кристаллов или их агрегатов, что они не могут более удерживаться в растворе и происходит выделение твердой фазы (осадка).

Характер осадка зависит от соотношения скоростей двух процессов: скорости образования зародышей – первичных центров кристаллизации v_1 , и скорости роста размеров зародышей v_2 . Значения v_1 и v_2 определяются относительным пересыщением, определяемым по формуле $(Q - P)/P$, где Q – концентрация растворенного вещества в пересыщенном растворе в какой либо момент времени, P – растворимость этого вещества при достижении состояния равновесия между твердой фазой и раствором при данной температуре [5].

Таким образом, при смешении вод двух типов в начальный момент времени систему можно характеризовать концентрацией смешения ($C_{см}$), т.е. начальной концентрацией сульфата бария, которая вообще может быть как меньше $C_{пр}$ (предельная растворимость), при данной минерализации и температуре, так и больше. Понятно, в первом случае, образование зародышей кристаллов и рост имеющихся – невозможен. Рассмотрим случай, когда $C_{см} > C_{пр}$ ($C_{см}$ – концентрация смешения, $C_{пр}$ – предельная растворимость).

Область концентраций смешения можно разделить на три зоны согласно рисунку 1:

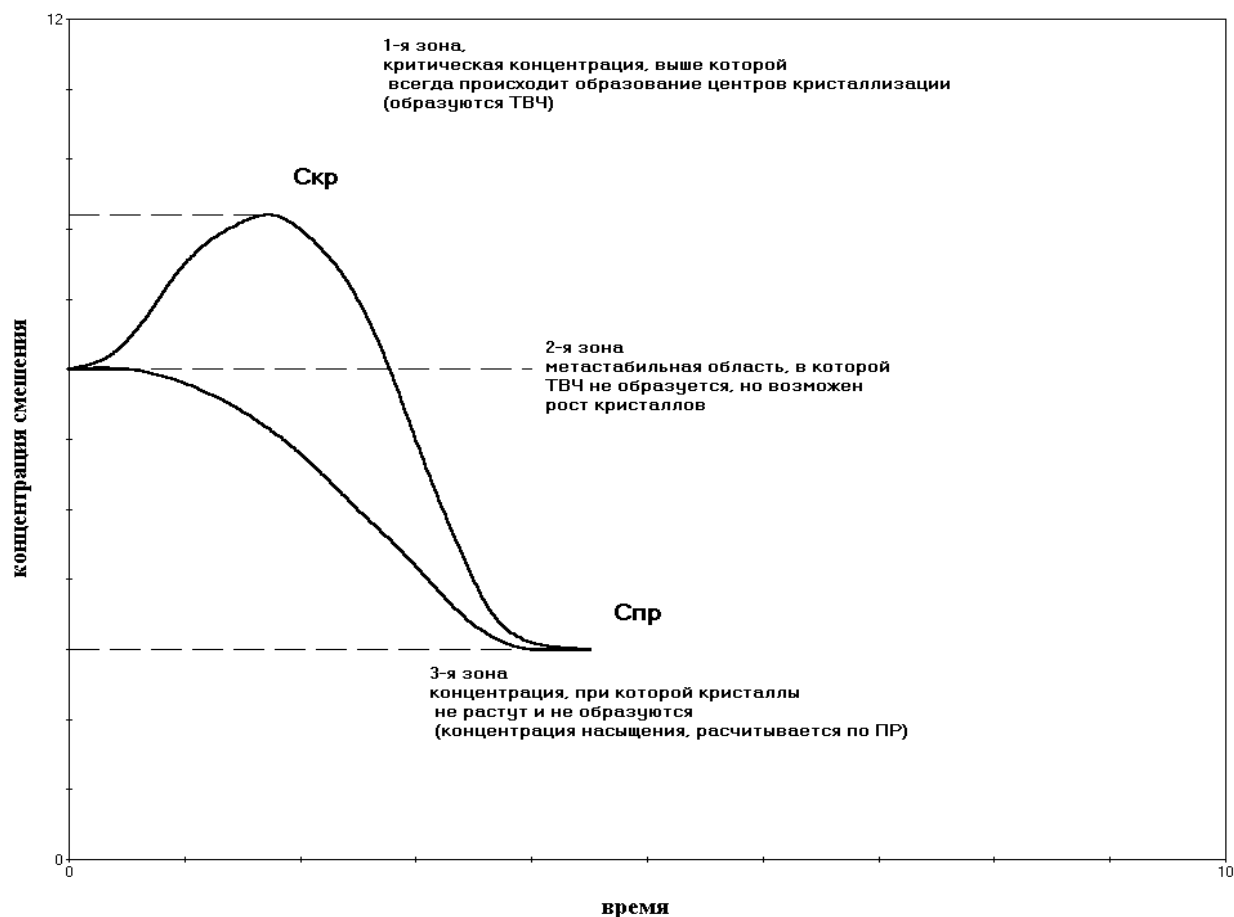


Рисунок 1. Зависимость концентрации смешения от времени

1* – значение концентрации смешения выше $C_{кр}$ (критическая концентрация зародышеобразования), в этой зоне всегда происходит образование центров кристаллизации и рост, образовавшихся зародышей, т.е. образуется ТВЧ.

2 – значение концентрации смешения меньше $C_{кр}$ но больше $C_{пр}$ (предельная концентрация или концентрация насыщения). В этой зоне новые центры кристаллизации не образуются, но наблюдается рост имеющихся, в том числе рост на центрах кристаллообразования, в качестве которых могут выступать твердые вещества близкие по природе (с близкими кристаллическими решетками). При этом рост заканчивается при достижении $C_{см}$ значения $C_{пр}$.

3 – значения концентрации смешения меньше $C_{пр}$, при такой концентрации не образуются кристаллы и не растут имеющиеся, ни при каких обстоятельствах, при постоянных термодинамических (в основном температура) и физико-химических (минерализация и соотношение противоионов – сульфат-ионов и ионов бария) условиях.

Для прогнозирования места отложения сульфата бария на ГНО и определения источника отложения была изучена кинетика образования сульфата бария при смешении минерализованных вод с различной концентрацией сульфат ионов и ионов бария. Для описания кинетики процесса нами использовались кривые зависимости изменения оптической плотности во времени после смешения двух жидкостей при определенной минерализации, в одной из которых содержится барий, в другой – сульфат-ионы с различными концентрациями. Кривые

можно разделить условно на два типа: с индукционным периодом (на рисунке красного цвета) и без выраженного индукционного периода (черного цвета). Кривые с выраженным индукционным периодом наблюдались только при смешении вод с эквимоллярными (или близкими к эквимоллярным) концентрациями сульфат-иона и ионов бария при относительном пересыщении 1 – 3, при этом индукционный период составлял максимум 5 – 8 мин, но время окончания реакции (положение минимума на кривой) в некоторых случаях составляет более 1 часа, и растет с ростом минерализации. При смешении вод с десятикратным избытком одного из противоионов при относительном пересыщении более 3 (случай наиболее часто встречающийся при нарушениях ЭК) и эквимоллярном соотношении при относительном пересыщении более 5 индукционный период практически отсутствует а время окончания реакции составляет не более 15 – 20 мин [6].

Все кривые условно можно разделить на три области согласно рисунку 2:

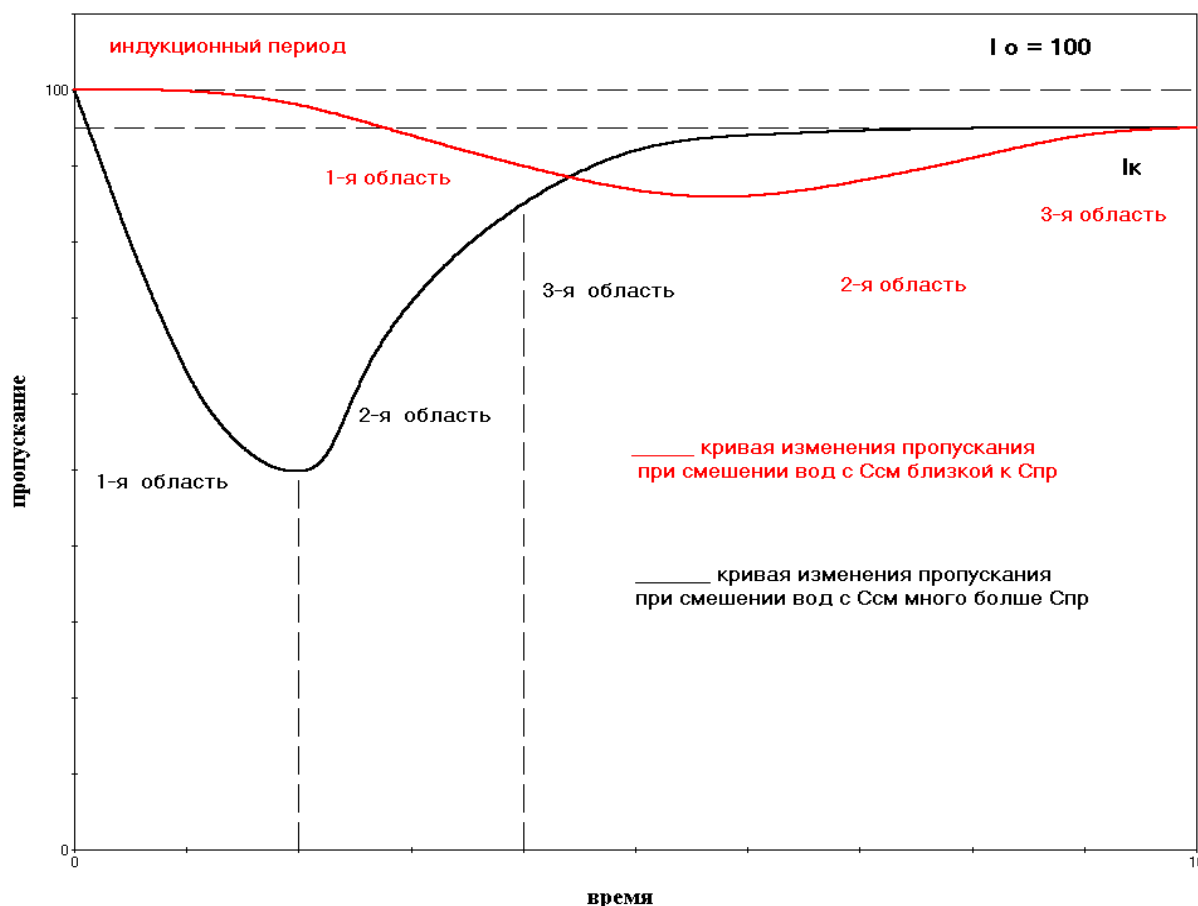


Рисунок 2. Зависимость изменения оптической плотности во времени

Первая область – от 0 до точки экстремума – происходит интенсивное образование центров кристаллизации и рост образовавшихся зародышей как на поверхности так и в объеме (пропускание падает до min), для эквимоллярных концентраций смешения возможно наличие горизонтального участка (индукционный период).

Вторая область – от min до некоторой границы – рост кристаллов еще продолжается, но их вес достиг критической массы – начинается процесс осаждения (седиментации), под действием силы тяжести, образование новых центров кристаллизации практически прекращается.

Третья область – рост кристаллов прекратился, достигнуто состояние равновесия «кристалл-раствор», осветление раствора происходит за счет осаждения.

$I_k < I_0$ ввиду осаждения части кристаллов на поверхности измерительной кюветы, по соотношению I_k / I_0 можно приблизительно оценить % осадка, который закрепляется на стенках (примерно 5-10 %). В данном случае не учитывается коэффициент формы – соотношение объема раствора к площади стенки V/S , но для открытой «бесконечной» трубы он всегда меньше чем для лабораторных условий (т.е. соотношение % осадка, который «закрепляется» на стенке трубы не более 5-10%).

Отсюда основной вывод: основной критерий, по которому можно сделать вывод о солеобразовании – наличие в составе ТВЧ сульфата бария.

Таким образом, зная конечный состав попутно добываемой воды (минерализацию, концентрацию ионов бария и сульфат-ионов) и концентрацию сульфата бария в составе ТВЧ, можно провести расчет «концентрации смешения». На основании анализа экспериментальных кривых были получены зависимости времени окончания реакции образования сульфата бария от «концентрации смешения» (рисунок 3) при различной минерализации.

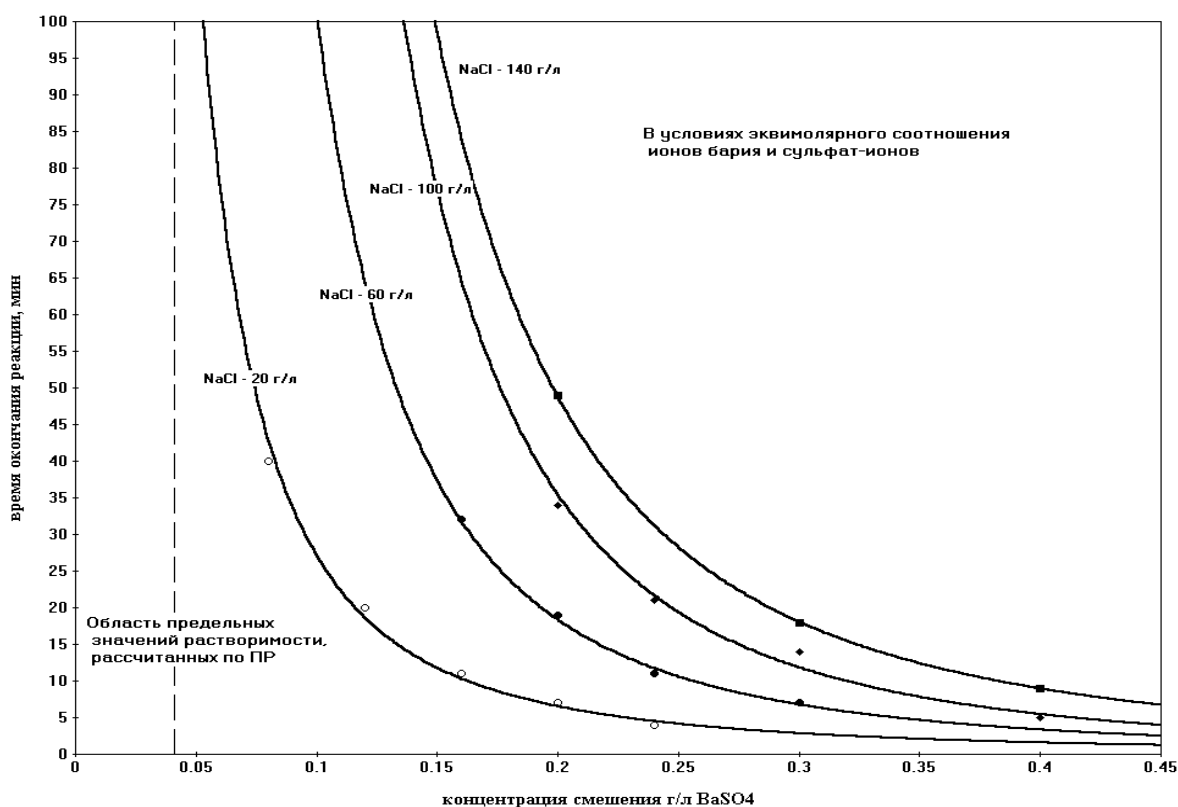


Рисунок 3. Зависимость времени окончания реакции образования сульфата бария от «концентрации смешения»

С целью выяснения скоростей роста отложений по участкам кривой изменения оптического пропускания был проделан следующий эксперимент:

Из колеса ЭЦН были вырезаны пластинки одинакового размера. Была выбрана кривая изменения оптической плотности при минерализации – 100 г/л по хлориду натрия при концентрации смешения – 0,3 г/л по сульфату бария. Кривая, условно была разбита по времени

реакции на 3 участка: 1 участок – начало, ниспадающий участок, соответствует началу 1-й области кривой рис. 2; 2 – середина, точка перегиба, соответствует концу 1-й области – началу 2-й области кривой рис. 2; 3 – конец, начало подъема кривой, соответствует концу 2-й области кривой рис. 2. Затравки выдерживались одинаковое время. Как показал анализ сформировавшихся отложений наибольшее количество сульфата бария образовалось на первом образце, наименьшее – на третьем.

Очевидно что, такое распределение по количеству отложения характерно для осаждения на центрах кристаллизации. Понятно, что в начальный момент времени движущая сила процесса кристаллизации – ΔC ($\Delta C = C_{см} - C_{пр}$) – максимальна, затем по мере снижения $C_{см}$ до $C_{кр}$ движущая сила процесса, а следовательно и количество отложения в единицу времени стремится к 0, при достижении $C_{см} = C_{пр}$ процесс осаждения прекращается.

Поэтому правильнее будет говорить не об индукционном периоде (за индукционный период как раз и возникают центры кристаллизации), а об окончании реакции кристаллизации сульфата бария. То есть построенные кривые (рисунок 3) позволяют определить время окончания процессов кристаллизации и вывести ЭЦН из этой зоны. Причем это время является максимальным, т.к. эти зависимости снимались в условиях неподвижной среды. Все вышеизложенное относится к высокообводненным скважинам с обводненностью более 80%.

Таким образом, отложение солей практически всегда сопровождается образованием ТВЧ, наличие в составе ТВЧ сульфата бария является первым сигналом для раннего прогнозирования солеотложений. Сравнение рассчитанного времени окончания реакции и времени подъема жидкости до ЭЦН, позволяет определить что является причиной отложения сульфата бария: смешение на забое (для многопластовых скважин или заколонные перетоки для однопластовых) или причина образования отложений – нарушение ЭК. На основании полученных зависимостей была разработана методика расчета времени окончания реакции образования сульфата бария по результатам анализа пластовых вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кашавцев, В.Е. Роль пластовых вод в процессе осадкообразования солей при добыче нефти / В.Е. Кашавцев // Нефть, газ и бизнес. – 2004. – №1. – С. 42–45.
2. Ибрагимов, Н.Г. Осложнения в нефтедобыче / Н.Г. Ибрагимов, А.Р. Хафизов, В.В. Шайдаков; под ред. Н.Г. Ибрагимова, Е.И. Ишемгужина. – Уфа: Монография, 2003. – 302 с.
3. Глущенко, В.Н. Нефтепромысловая химия: Осложнения в системе пласт – скважина – УППН / В.Н. Глущенко, М.А. Силин, О.А. Пташко, А.В. Денисова – М.: МАКС Пресс, 2008. – 328 с.
4. Муслимов, Р.Х. Современные методы повышения нефтеизвлечения: проектирование, оптимизация и оценка эффективности: Учебное пособие. – Казань: Изд-во «Фэн» Академии наук РТ, 2005. – 688 с.
5. Пилипенко, А.Т. Аналитическая химия. В двух книгах: кн 1 / А.Т. Пилипенко, И.В. Пятницкий – М.: Химия, 1990. – 480с.
6. Шангараева, Л.А. Кинетика формирования солеотложений сульфата бария при самопроизвольном его осаждении в пересыщенных водных растворах / Л.А. Шангараева, А.В. Петухов // Нефтегазовое дело. – 2012. – Выпуск 10. – №1. – С. 22-27.

Shangaraeva Liliya Al'bertovna

National mineral resources university (Mining university)
Russia, Saint-Petersburg
E-mail: l.shangaraeva@mail.ru

Sultanova Dina Anasovna

National mineral resources university (Mining university)
Russia, Saint-Petersburg
E-mail: dasultanova@gmail.com

Study the mechanism of scale formation in the downhole equipment during the operation of multi wells

Abstract. The problem of scale is a constant companion of operation of wells and downhole equipment, both on the initial and the later stages of of oil field development. The paper presents the results of laboratory experiments on the study of the barium sulfate scale formation in the downhole equipment. On the basis of dependency we have developed a methodology for calculating the end of the reaction of barium sulfate formation according to the analysis of reservoir water.

Keywords: scale; barium sulfate; induction period; precipitation; supersaturation; mixing water; seed crystals; concentration of mixing; sulfate ions; barium ions.

REFERENCES

1. Kashchavtsev, V.E. Rol' plastovykh vod v protsesse osadkoobrazovaniya soley pri dobyche nefi / V.E. Kashchavtsev // *Neft', gaz i biznes.* - 2004. - №1. - S. 42-45.
2. Ibragimov, N.G. Oslozhneniya v neftedobyche / N.G.Ibragimov, A.R. Khafizov, V.V. Shaydakov; pod red. N.G.Ibragimova, E.I. Ishemguzhina. - Ufa: Monografiya, 2003. - 302 s.
3. Glushchenko, V.N. Neftepromyslovaya khimiya: Oslozhneniya v sisteme plast – skvazhina – UPPN / V.N. Glushchenko, M.A. Silin, O.A. Ptashko, A.V. Denisova – M.: MAKS Press, 2008. – 328 s.
4. Muslimov, R.Kh. Sovremennye metody povysheniya nefteizvlecheniya: proektirovanie, optimizatsiya i otsenka effektivnosti: Uchebnoe posobie. – Kazan': Izd-vo «Fen» Akademii nauk RT, 2005. – 688 s.
5. Pilipenko, A.T. Analiticheskaya khimiya. V dvukh knigakh: kn 1 / A.T. Pilipenko, I.V. Pyatnitskiy – M.: Khimiya, 1990. – 480s.
6. Shangaraeva, L.A. Kinetika formirovaniya soleotlozheniy sul'fata bariya pri samoproizvol'nom ego osazhdenii v peresyshchennykh vodnykh rastvorakh / L.A. Shangaraeva, A.V. Petukhov // *Neftegazovoe delo.* – 2012. – Vypusk 10. – №1. – S. 22-27.