

СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА ТЕХНОГЕННОГО СОЛЕОТЛОЖЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

С.Н. Попов, Г.Ю. Исаева
Институт проблем нефти и газа РАН, Москва
e-mail: popov@ipng.ru

В настоящее время многие нефтяные и газовые месторождения эксплуатируются с существенной обводненностью добываемого сырья. Подобные факты зачастую приводят к солеобразованию, как в оборудовании скважины, так и в коллекторе [2, 4, 5, 6]. Техногенные солеотложения также могут возникать и при использовании методов интенсификации добычи углеводородов.

Механизмы, виды и масштабы солеотложения в пластовых и скважинных условиях исследуются многие десятилетия [3, 5, 6, 7 и др.]. Однако до настоящего времени информативность методов количественного прогноза природного и техногенного солеотложения остается невысокой. Характеризуя известные методы прогнозирования природного и техногенного солеотложения, следует отметить некоторые общие для них черты: во-первых, по своей физико-химической сущности они практически однотипны; во-вторых, каждый из методов обладает своей параметрической областью устойчивых решений; в-третьих, большинство из них нацелено на избирательный прогноз выпадения того или иного минерала или типа засоления (карбонатного, сульфатного, хлоридного, смешанного); в-четвертых, большинство из них имеет “региональную” привязку; и, наконец, в-пятых, ни один из них не обладает универсальностью.

В такой ситуации, к сожалению, часто приходится встречаться с неверным выбором метода прогноза солеотложения и, как следствие, с получением неверных результатов моделирования. Именно поэтому была сформулирована и реализована идея создания компьютерной системы, построенной по принципу экспертной системы, способной изначально правильно выбирать соответствующий термобарическим и гидрохимическим условиям метод прогноза солеотложения. Поэтому предлагаемая нами система отлична от предшествующих разработок прежде всего своей ролью “навигатора”, позволяющего во множестве доступных методов отыскать наиболее приемлемый для решения той или иной конкретной задачи.

По своим принципам предложенный метод наделен свойствами экспертной системы. Разработанная последовательность продукционных правил позволяет подбирать по исходной информации о термобарических и гидрохимических параметрах коллекторов

наиболее оптимальный метод оценки геохимического равновесия между подземными водами и породообразующими минералами. Для этих целей составлена электронная библиотека методов, популярных при решении поисковых и промысловых задач (авт. В.Е. Кашавцев, Скилмен-МакДональд-Стифф, В.П. Зверев, В.А. Панов, А.А. Емков и Г.Н. Позднышев, Ю.П. Гаттенбергер и В.П. Дьяков, В.П. Озябкин, Д.М. Бриль и Р.А. Рашитова, Ю.В. Антипин и др.). Программно предусмотрена возможность альтернативного выбора одного из них (или группы методов).

Альтернативное обращение к различным методическим разработкам, с одной стороны, обеспечивает свободный выбор пользователем способов расчетов, с другой – позволяет ему производить сравнение их разрешающих способностей группы близких методов расчета, анализировать согласованность и расхождение получаемых результатов.

Одним из явных недостатков современных методов прогнозирования выпадения твердых минеральных осадков является неспособность учесть смешанный характер солеотложения. Как правило, любой метод ориентирован на оценку только одного из видов солеотложения (карбонатного, сульфатного, хлоридного), в то время как природа не знает подобной избирательности. Химические анализы реальных отложений солей в коллекторах и на нефтепромысловом оборудовании показывают их сложный многосоставный характер. Более того, надо иметь в виду, что существует строго определенная последовательность солеотложения. Независимо от того, какой вид солеотложения интересует исследователя, эта физико-химическая особенность солеобразования обязательно должна существовать. В табл. 1 приведены данные различных авторов по изменению последовательности выпадения солей.

В программном комплексе Aqua-Solt этот недостаток был устранен с помощью учета последовательности выпадения солей. На каждом вычислительном этапе (после выпадения любой менее растворимой соли) проводится сравнение значений произведения растворимости оставшихся в растворе солей и формируется новая последовательность их выпадения. Алгоритмически такая идея реализуется проверкой гипотезы соответствия этой последовательности по следующим цепочкам:

а) для температуры ниже 70 °С



Таблица 1

Последовательность выпадения солей (по опубликованным источникам)

Последовательность выпадения солей, принятая в расчетах В.Е. Кашавцева (указана в скобках)	Значения произведения растворимости (ПР) при различных температурах и по различным литературным источникам (последовательность указана в скобках)			
	по работе [4]	по работе [1,8]		
	при 25 °С	при 25 °С	при 100 °С	при 200 °С
BaSO ₄ (1)	$1,8 \cdot 10^{-10}$ (1)	$1,8 \cdot 10^{-10}$ (1)	$5,1 \cdot 10^{-10}$ (1)	$4,8 \cdot 10^{-11}$ (2)
SrSO ₄ (2)	$2,1 \cdot 10^{-7}$ (4)	$2,1 \cdot 10^{-7}$ (3)	$1,3 \cdot 10^{-7}$ (4)	$4 \cdot 10^{-9}$ (4)
CaCO ₃ (3)	$3,3 \cdot 10^{-9}$ (2)	$4 \cdot 10^{-9}$ (2)	$4,7 \cdot 10^{-10}$ (2)	$4,3 \cdot 10^{-12}$ (1)
MgCO ₃ (4)	$3,5 \cdot 10^{-8}$ (3)	$7,9 \cdot 10^{-6}$ (4)	$9,7 \cdot 10^{-8}$ (3)	$2,9 \cdot 10^{-10}$ (3)
CaSO ₄ (5)	$3,7 \cdot 10^{-5}$ (5)	$3,7 \cdot 10^{-5}$ (5)	$3,2 \cdot 10^{-6}$ (5)	$1,4 \cdot 10^{-8}$ (5)

б) для температуры выше 70 °С



Математически проблема выбора решается привлечением методов итерации и упорядочения по выбранному критерию (условия выбора по наибольшей величине произведения растворимостей). Оценка количества выпадающих солей производится на основе закона действующих масс. Сравнение концентраций в эквивалентной форме показывает, какие катионы или анионы связываются полностью и насколько велик остаток одного из них для следующего этапа осаждения солей. Ниже продемонстрирована последовательность вычислительных операций на примере CaCO₃.

При условии $R_{\text{Ca}} < R_{\text{CO}_3}$

$$\begin{aligned} C'_{\text{Ca}} &= 0; \\ R'_{\text{CO}_3} &= R_{\text{CO}_3} - R_{\text{Ca}}; \\ C'_{\text{CO}_3} &= R_{\text{CO}_3} \cdot M_{\text{CO}_3}; \\ M' &= M - C_{\text{Ca}} - C_{\text{CO}_3} + C'_{\text{CO}_3}; \\ R_{\text{CaCO}_3} &= R_{\text{Ca}}; \\ G_{\text{CaCO}_3} &= R_{\text{CaCO}_3} \cdot M_{\text{CaCO}_3}; \\ R_{\text{CaCO}_3} &= R_{\text{Ca}}; \\ G_{\text{CaCO}_3} &= R_{\text{CaCO}_3} \cdot M_{\text{CaCO}_3}; \end{aligned}$$

При условии $R_{\text{Ca}} > R_{\text{CO}_3}$

$$\begin{aligned} C'_{\text{CO}_3} &= 0; \\ R'_{\text{Ca}} &= R_{\text{Ca}} - R_{\text{CO}_3}; \\ R'_{\text{Ca}} &= R_{\text{Ca}} - R_{\text{CO}_3}; \\ C'_{\text{Ca}} &= R_{\text{Ca}} \cdot M_{\text{Ca}}; \\ M' &= M - C_{\text{CO}_3} - C_{\text{Ca}} + C'_{\text{Ca}}; \\ R_{\text{CaCO}_3} &= R_{\text{CO}_3}; \\ G_{\text{CaCO}_3} &= R_{\text{CaCO}_3} \cdot M_{\text{CaCO}_3}, \end{aligned}$$

где

$R_{\text{Ca}}, R_{\text{CO}_3}$ - исходное содержание ионов соответственно Ca^{+2} и CO_3^{2-} , мг-экв-%;

$R'_{\text{Ca}}, R'_{\text{CO}_3}$ - содержание Ca^{+2} и CO_3^{2-} после выпадения CaCO₃, мг-экв-%;

$C'_{\text{Ca}}, C'_{\text{CO}_3}$ - концентрации соответственно ионов Ca^{+2} и CO_3^{2-} в равновесном растворе, г/л;

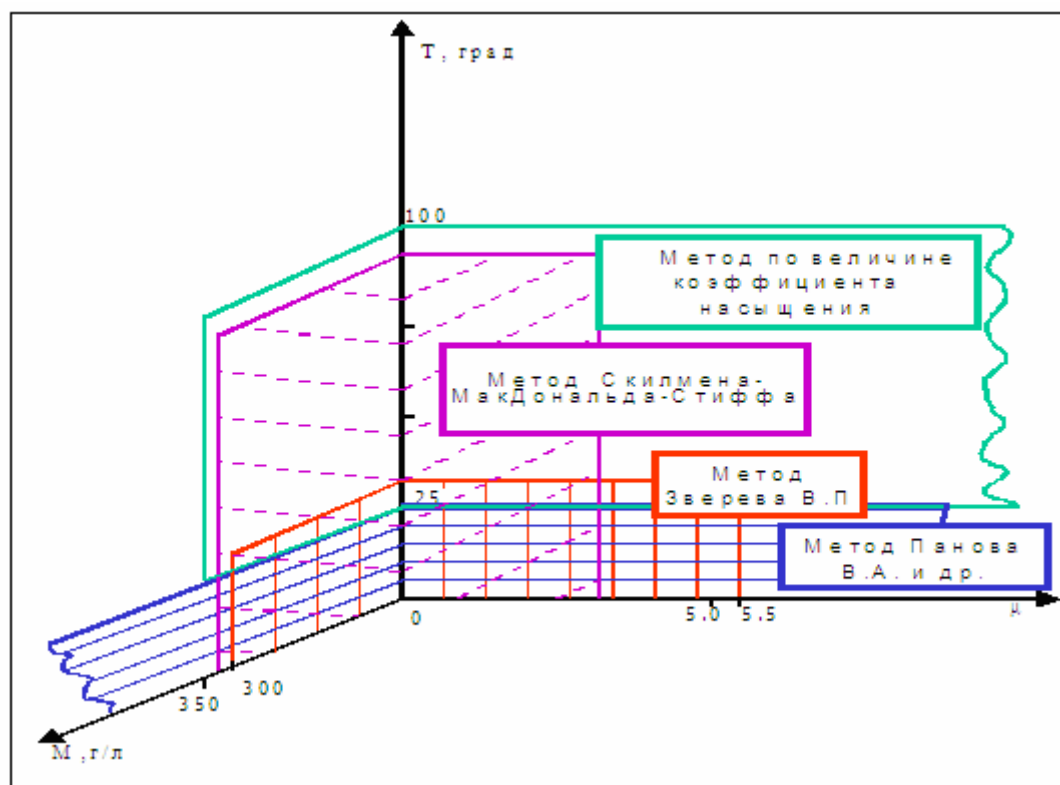
M, M' - исходное и "равновесное" значения минерализации исходных вод, г/л;

M_{CO_3} - эквивалент CO_3^{2-} ;

G_{CaCO_3} - количество выпавшего осадка CaCO₃ из одного литра исходной смеси пластовых и технических вод.

Как видно из данных, приведенных в табл. 1, существуют некоторые различия в представлениях разных авторов о последовательности выпадения солей. Кроме того, следует отметить, что данные, приведенные в табл., не совсем корректно описывают последовательность солеотложения, так как они характеризуют растворимость минеральных солей в дистиллированной воде. В действительности ситуация сложнее, и в конкретных (термобарических и гидрохимических) условиях последовательность выпадения солей будет изменяться. Таким образом, получение надежных экспериментальных физико-химических данных о последовательности выпадения солей – один из путей повышения качества прогноза солеотложений, т.е. смещения геохимического равновесия в системе вода–порода.

Другая проблема, влияющая на качество прогнозов выпадения солей, – параметрическое ограничение используемых методов. На рисунке в качестве примера демонстрируются различия в параметрических ограничениях наиболее известных методов прогноза сульфатного солеотложения.



Параметрические различия наиболее популярных методов оценки осаждения гипса из природных вод

Это, как правило, не учитывается геологами, и методы, разработанные для одних геологических регионов (например, для Урало-Поллжья), автоматически переносятся на другие природные условия, что приводит к получению неверных результатов прогноза.

Назовем другие не менее важные вопросы, которые влияют на качество прогноза и решение которых пока не найдено. Так, практически не изучена проблема выпадения в осадок органических солей. В целом солевые осадки, образующиеся при добыче нефти, имеют сложный состав и содержат как минеральную, так и органическую составляющую. Учитывая это, необходимо признать, что разработка физико-химических и математических методов оценки масштабов выпадения из природных и техногенных вод органических и металлоорганических комплексов – одна из важнейших задач данного направления.

Огромное значение имеет уточнение используемых термодинамических параметров. Получение информации о гидрохимическом фоне разработки нефтяных месторождений (о составе природной, технической и попутной воды) послужит основой оптимизации последующих расчетов и действенным образом скажется на качестве научных прогнозов времени и масштабов возможного солеобразования.

Обеспечение расчетов надежными термодинамическими критериями позволит решить и другую проблему – расширения числа исследуемых минералов. Традиционно расчет ведется только по наиболее известным минералам. Но практика показывает, что при разработке месторождений в солеобразовании обнаруживается более широкий спектр минералов (тахигидрит, бароцелестин, халцедон и др.).

Необходима дальнейшая проработка вопроса по оценке качества исходного материала. Как справедливо отмечалось ранее, критерии отбраковки некачественных данных для различных геологических регионов не могут быть одинаковыми [1].

Учитывая сложность состава солевых и других отложений; разнообразие механизмов их образования, связанных с интенсивной химизацией технологических процессов добычи нефти; возможность образования новых соединений; а также важность проблемы предотвращения солеотложения и борьбы с этим явлением на нефтепромыслах [2, 4, 6, 7 и др.], представляется целесообразным создание систем гидрохимического мониторинга на всех действующих промыслах.

Необходимо продолжить работы по совершенствованию отдельных блоков алгоритма. В частности, заслуживает более тщательной проработки вопрос об оценке

динамики и последствий смешения вод различного состава. Данную проблему можно решить с помощью современного программного обеспечения, например CMG STARS (Computer Modeling Group) или Eclipse (Schlumberger). В данных программных комплексах наряду с гидродинамическим моделированием процесса трехмерной трехфазной фильтрации был реализован математический аппарат, позволяющий моделировать химические реакции, в том числе с образованием солеотложений в виде твердой фазы. Для моделирования химической реакции в модуле STARS следует дополнительно задать ряд параметров:

- стехиометрические коэффициенты реагентов и продуктов реакции;
- молекулярные массы каждого из компонентов реакции;
- принадлежность каждого компонента реакции к фракции флюида (водного, нефтяного, газового) или к твердому осадку;
- массовую или молярную плотность;
- мольную долю каждого компонента (если таковых несколько) в каждой фракции.

Результаты выполненных исследований показали, что учет изменения и распределения растворенных солей и твердой фазы позволяет более обоснованно прогнозировать появление техногенных солеотложений на конкретных месторождениях углеводородов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абукова Л.А., Иванова А.В., Исаева Г.Ю.* Технология автоматизированного выбора метода изучения минерального солеотложения в пластовых и скважинных условиях // Геология, геофизика и разраб. нефт. и газовых месторождений. 2002. № 5. С. 90–95.
2. *Бриль Д.М., Рашитова Р.А.* Упрощенный метод прогнозирования выпадения осадка карбоната кальция в сточных водах нефтепромыслов // Нефт. хоз-во. 1985. № 2. С. 30–33.
3. *Исаева Г.Ю.* Разработка методики и модели компьютерного прогнозирования процесса солеотложения в нефтяных пластах при заводнении: Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 2000.
4. *Кащавцев В.Е., Гаттенбергер Ю.П., Люшин С.Ф.* Предупреждение солеобразования при добыче нефти. М.: Недра, 1985. 215 с.
5. *Крайнов В.М., Швец В.М.* Гидрогеохимия. М.: Недра, 1992. 462 с.

6. *Панов В.А., Емков А.А., Позднышев Г.Н.* Оценка склонности пластовых вод к отложению гипса в нефтепромысловом оборудовании // Нефт. хоз-во. 1980. № 2. С. 39–40.
7. *Потапов С.С.* К проблеме солеотложения в нефтепромысловом оборудовании “Лукойл-Когалымнефтегаз” // Урал. минерал. сб. 1997. № 7. С. 233–249.
8. Справочник по растворимости. Л.: Наука, 1970. 653 с.