

ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА МЕТОДА ИЗУЧЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СОЛЕОТЛОЖЕНИЯ В ПЛАСТОВЫХ И СКВАЖИННЫХ УСЛОВИЯХ

Л. А. Абукова, А. В. Иванова, Г. Ю. Исаева
(ИПНГ РАН)

Проблема солеотложения в нефтегазоносных коллекторах в последнее десятилетие обрела большую значимость практически для всех нефтегазодобывающих регионов России.

Причины солеотложения достаточно разнообразны (использование технических маломинерализованных вод для поддержания пластового давления при добыче нефти, смешение природных вод различного генезиса и химического состава, прорывы глубинных кислых газов).

Солеотложение встречается в основном на нефтегазопромысловых объектах, но известны случаи выпадения солей в поровое пространство коллекторов и на подземных хранилищах газа.

Проблему активно исследуют с 1940-х гг., и за прошедшие десятилетия разработан ряд методических подходов к прогнозированию солеотложения в природных и техногенных условиях. Эти методы роднит многое: во-первых, по своей физико-химической сущности они практически однотипны; во-вторых, каждый метод 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; 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 — получения неверного результата моделирования. Именно поэтому возникла идея создания компьютерной системы, построенной по прин-

В статье изложены результаты исследования по выбору метода солеотложения в природных и техногенных условиях. Показано, что эти методы имеют свою устойчивую область параметрических решений. Кроме того, многие из них базируются на обобщении регионального гидрохимического материала, что также должно учитываться при выборе метода прогноза выпадения минеральных солей в скважине и призабойной зоне пласта. Процедура выбора метода решения автоматизирована.

The authors have elaborated the technology of the computerized select of a method of predicting the tendency of oil field waters to deposit mineral salt. The paper is devoted to a problem of a select of a method of salt depositions simulation in oil-and-gas-bearing basins. Usage of this method will allow to increase quality of the prognosis of salt depositions in oil fields and wells.

ципу экспертной системы, способной изначально правильно выбрать наиболее соответствующий термобарическим и гидрохимическим условиям метод прогноза солеотложения. Поэтому предлагаемая система отличается от предшествующих разработок, прежде всего, своей ролью "навигатора", позволяющего во множестве доступных методов отыскать тот, который наиболее приемлем для решения той или иной конкретной задачи.

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, наиболее популярных при решении поисковых и

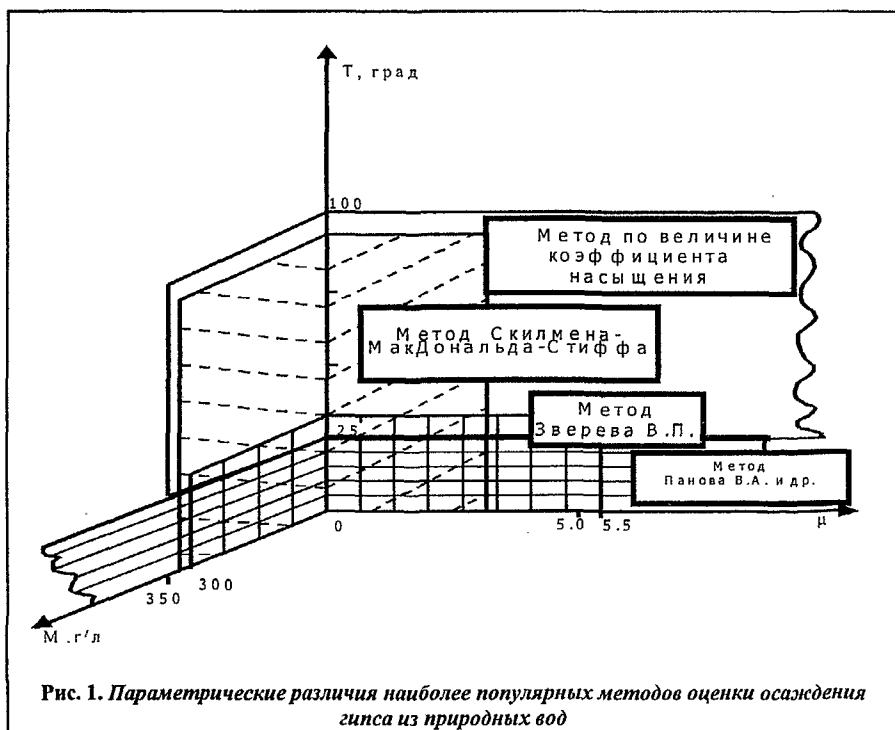


Рис. 1. Параметрические различия наиболее популярных методов оценки осаждения гипса из природных вод

промысловых задач (авторы 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 разрешающих способностей группы близких методов расчета, анализировать согласованность и расхождение получаемых результатов. Рисунок поясняет возможность альтернативного выбора метода расчета геохимического равновесия в системе вода—гипс. Нетрудно видеть, что существуют интервалы значений температуры, минерализации, ионной силы подземных вод, где пригодны несколько методов, но есть и такие параметрические области, где действует только единственная методика.

Итак, альтернатива выбора состоит в том, что пользователь может:

- либо считать только по одной методике (например, по той, которую он знает и которой верит);
- либо считать по группе методик (и сравнивать результаты расчета между собой);
- либо следовать предлагаемым ему советам и из группы возможных методов выбирать лишь те (или тот), которые более всего согласованы с исходным материалом.

Таким образом, в системе нет принуждения, но есть осмысленный выбор наиболее корректного метода расчета.

Принцип альтернативного доступа к методам обработки дополнен решающим критерием их выбора. Безусловно, что таким критерием является сопоставление результатов расчетов с промысловыми данными. Только такая проверка может стать основанием для выбора одного или группы методов для количественной оценки процессов солеотложения [2].

Общая структура технологии автоматизированного выбора метода прогноза минерального солеотложения отражена в табл. 1.

Чрезвычайно важно при анализе солеотложения смешанного типа учитывать последовательность выпадения солей [3]. В табл. 2 приведены данные по изменению последовательности выпадения солей, используемой различными авторами.

Но на самом деле данные, приведенные в табл. 2, тоже не совсем корректно описывают последовательность солеотложения, так как они характеризуют растворимость минеральных солей в дистиллированной воде. В действительности картина сложнее и в каждой конкретной ситуации (т. е. при конкретных термобарических и гидрохимических условиях) последовательность выпадения солей будет меняться.

Основные структурные блоки технологии прогноза солеотложения в пластовых условиях

I. Ввод исходных данных	
1. Ввод исходной информации.	
2. Пересчет концентраций солеобразующих ионов в необходимую для расчетов форму их представления.	
3. Проверка качества исходной информации и принятие решения об исключении некачественных анализов для последующих расчетов.	
II. Смешение вод	
Этот блок вычислительных процедур подключается, если это необходимо для решения поставленной задачи.	
III. Физико-химические параметры системы	
1. Расчет ионной силы раствора, коэффициента активности ионов и произведения растворимости солей.	
2. Пересчет в автоматическом режиме молярности, моляльности, ионной силы и коэффициента активности ионов после каждого зафиксированного акта выпадения соли.	
IV. Оценка масштабов и типов солеобразования	
Этот блок организует непосредственно расчеты геохимических равновесий в системе минерал — вода.	
Для <i>барита, стронция и ангидрита</i> : метод оценки термодинамического равновесия коэффициентом насыщения воды по отношению к минералу.	
Для <i>гипса</i> : 1) метод В.А. Панова, А.А. Емкова, Г.Н. Позднышева (при $t \leq 30 \text{ }^\circ\text{C}$); 2) метод В.П. Зверева (при $t \leq 40 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\mu \leq 5,5$); 3) метод Скилмена—МакДональда—Стиффа (при $t \leq 90 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\mu \leq 3,6$); 4) метод коэффициента насыщения (при $t > 90 \text{ }^\circ\text{C}$).	
Для <i>кальцита</i> : 1) метод Д.М. Бриль и Р.А. Рашитовой (при $t < 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $\mu \leq 5,5$ и $p_{\text{CO}_2} < 0,2 \text{ МПа}$); 2) метод Стиффа и Дэвиса (при $t < 90 \text{ }^\circ\text{C}$, $\mu \leq 3,6$); 3) метод Дж. Е. Оддо и У. Райса (при $t < 150 \text{ }^\circ\text{C}$ и $p_{\text{CO}_2} \leq 6,2 \text{ МПа}$).	

Таблица 2

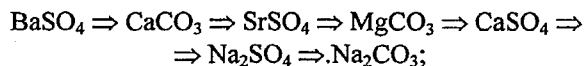
Последовательность выпадения солей (по опубликованным источникам)

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

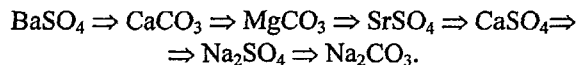
В нашем алгоритме предложена динамическая система определения последовательности выпадения солей, основанная на том, что на каждом вычислительном этапе (после выпадения любой предшествующей соли) проводится сравнение произведений растворимости оставшихся в растворе солей и формируется новая последовательность выпадения. Поскольку реальные последовательности будут в большей или меньшей степени отражать те тенденции,

которые присущи дистиллированной воде, алгоритмически такая идея реализуется проверкой гипотезы соответствия последовательности выпадения солей следующим цепочкам:

а) для температуры до 70 °С



б) для температуры свыше 70 °С



Математически проблема выбора решается привлечением методов итерации и упорядочения по выбранному критерию (условия выбора по наибольшему произведению растворимости). 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 CaCO_3 .

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

$$C'_{\text{Ca}} = 0;$$

$$R'_{\text{CO}_3} = R_{\text{CO}_3} - R_{\text{Ca}};$$

$$C'_{\text{CO}_3} = R_{\text{CO}_3} \cdot M_{\text{CaCO}_3};$$

$$M' = M - C_{\text{Ca}} - C_{\text{CO}_3} + C'_{\text{CO}_3};$$

$$R_{\text{CaCO}_3} = R_{\text{Ca}};$$

$$G_{\text{CaCO}_3} = R_{\text{CaCO}_3} \cdot M_{\text{CaCO}_3};$$

$$R_{\text{CaCO}_3} = R_{\text{Ca}};$$

$$G_{\text{CaCO}_3} = R_{\text{CaCO}_3} \cdot M_{\text{CaCO}_3};$$

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

$$C'_{\text{CO}_3} = 0;$$

$$R'_{\text{Ca}} = R_{\text{Ca}} - R_{\text{CO}_3};$$

$$R'_{\text{Ca}} = R_{\text{Ca}} - R_{\text{CO}_3};$$

$$C'_{\text{Ca}} = R_{\text{Ca}} \cdot M_{\text{Ca}};$$

$$M' = M - C_{\text{CO}_3} - C_{\text{Ca}} + C'_{\text{Ca}};$$

$$R_{\text{CaCO}_3} = R_{\text{CO}_3};$$

$$G_{\text{CaCO}_3} = R_{\text{CaCO}_3} \cdot M_{\text{CaCO}_3};$$

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} CO_3^{2-} после выпадения CaCO_3 , 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_{CaCO_3} — эквивалент CO_3^{2-} ;

G_{CaCO_3} — количество выпавшего осадка CaCO_3 из 1 л исходной смеси пластовых и технических вод.

Для иллюстрации возможностей и особенностей основного алгоритмического блока ниже приведен пример анализа процесса солеотложения на Ярино-Каменноложском нефтяном месторождении по материалам скв. 520 (башкирский ярус). Минерализация вод высокая (196 г/л), состав вод — хлоридно-натриевый. Содержание кислых компонентов не превышает 1,5 г/л.

Моделировали смешение пластовых вод с поверхностными русловыми водами низкой минерализации с

содержанием гидрокарбонат-иона и сульфат-иона, сопоставимым с пластовой водой. Более подробно исходные данные для моделирования отражены в сводной табл. 3. По этим материалам оценена возможность последовательного выпадения кальцита и гипса.

Результаты моделирования. В качестве исходного метода анализа в автоматическом режиме выбрана методика [1]. Расчеты, проведенные по этой методике, свидетельствуют о том, что выпадение в осадок карбоната кальция при заданных условиях термодинамически оправдано.

Для того чтобы было ясно, что в случае использования других менее подходящих методик итоговый вывод мог быть иным, дополнительно выполнены расчеты по методикам Стиффа—Дэвиса, Райса—Оддо (в модификации Г.Ю. Исаевой) и В.Е. Кашавцева. Из табл. 3 видно, что при использовании методики Кашавцева получен иной смысловой результат. Стало быть, при некорректном выборе метода исследования (каким в данном случае мог стать метод В.Е. Кашавцева*) результаты были бы получены неверные. Если иметь в виду, что моделирование выпадения карбоната кальция — первый этап анализа солеотложения смешанного типа, то все последующие расчеты также оказались бы искаженными.

Факт же совпадения результатов расчета по методике [1] с результатами счета по двум другим использованным методам только доказывает правильность нашего подхода. Обратим внимание, что по параметрическим областям применения метод Бриля-Рашитовой занимает промежуточное положение между двумя другими (методы Стиффа—Дэвиса и Райса—Оддо), а значит, правильность расчета подтверждена и по нижнему, и по верхнему пределам используемых параметров.

В результате смешения вод и последующего выпадения карбоната кальция исходный состав изменился.

Второй этап моделирования имитирует осаждение гипса (табл. 3). Логика расчета повторяется. Сначала по набору исходных параметров производятся автоматизированная экспертиза методов и выбор оптимального. В данном случае оптимальным является метод В.А. Панова [5]. Таблица 3 содержит результаты расчетов и по другим известным методам оценки геохимических равновесий между подземными водами и гипсом. Это опять-таки сделано лишь для демонстрации риска получения качественно иного результата при неточном выборе метода анализа. Итак, методика В.А. Панова смогла количественно оценить факт выпадения гипса. Аналогичный результат получен и по методике В.П. Зверева, однако эта методика, как следует из описания алгоритма, близка к методике В.А. Панова. По двум другим методам получены отрицательные результаты. Но отметим важное: в геоло-

* По нашим количественным оценкам, метод В.Е. Кашавцева хорошо оправдывает себя в более жестких термобарических условиях.

гическом разрезе подстилающих отложений обнаружены самостоятельные прослои гипса и ангидрита, которые могли быть (и, скорее всего, являлись) источником повышенного содержания кальция и гидрокарбонат-иона в пластовых водах, поэтому выпадение гипса можно считать доказанным независимым анализом.

Таблица 3

Сводная таблица результатов прогноза минерального солеотложения на Ярино-Каменноложском месторождении (скв. 520, коллектор терригенный)

Исходные данные для моделирования смешения вод различного состава и генезиса					
Ионы, г/л	Пластовая вода	Закачиваемая вода			
Cl	120,60	0,023			
SO ₄	1,13	1,184			
HCO ₃	0,18	0,247			
Ca	13,25	0,516			
Mg	3,25	0,033			
Na+K	56,66	0,020			
Fe	0,20	—			
Минерализация, г/л	196,00	2,00			
Плотность, г/см ³	1,128	1,000			
pH	6,67	—			
Температура, °C	20,5	20,5			
Давление, МПа	13,7	13,7			
Парциальное давление CO ₂	0,1	—			
Результаты моделирования при пропорции смешения вод 9:1					
Химический состав смеси, мг/л					
Cl	SO ₄	HCO ₃	Ca	Mg	Na+K
108542,3	1135,4	184	12606,6	2923,8	50996
Микроэлементы, мг/л		ρ, г/см ³	M, г/л		
Fe-0,18		1,115	176,4		

Содержание кальция после выпадения осадка, мг/л						12073,3
Количество выпавшего осадка, мг/л						1609,1
Новый химический состав воды, мг/л						Минерализация, г/л
Cl	SO ₄	HCO ₃	Ca	Mg	Na+K	
108542,3	0	0	12073,3	2923,8	50996,0	174,6
Исследуется CaSO ₄ ·2H ₂ O						
Расчет по выбранному методу		Расчет по другим методам				
Методика В.А. Панова	В.П. Зверева	Скилмена—МакДональда—Стиффа		В.Е. Кашавцева		
Коэффициент перенасыщенности: S=1,09	Индекс насыщения: S=4,82	Фактическая концентрация гипса: S ₁ =-456,9 Теоретическая концентрация гипса: S ₂ =152784,2 S ₁ -S ₂ =-153241,1		Коэффициент насыщения: S=0,81		
Критерий оценки: S > 1	Критерий оценки: S > 1	Критерий оценки: S ₁ -S ₂ < 0		Критерий оценки: S < 1		
Вывод: Возможно выпадение осадка в виде сульфата кальция		Вывод: Возможно выпадение осадка в виде сульфата кальция		Вывод: Осадок не выпадает		
Содержание кальция после выпадения осадка, мг/л						12073,3
Количество выпавшего осадка, мг/л						1609,1
Новый химический состав воды, мг/л						Минерализация, г/л
Cl	SO ₄	HCO ₃	Ca	Mg	Na+K	
108542,3	0	0	12073,3	2923,8	50996,0	174,6

Таким образом, даже этот пример свидетельствует в пользу применения предлагаемой технологии автоматизированного выбора метода прогноза солеотложения в нефтегазоносных коллекторах.

Итак, еще раз подчеркнем, что разработанная нами технология позволяет выполнять ряд процедур, направленных на улучшение качества расчетов, повышения достоверности результатов моделирования. В частности, производятся оценка погрешности исходных данных (в зависимости от содержания отдельных ионов, минерализации вод, соотношений солеобразующих ионов между собой, условий электронейтральности и др.); учет минерализации (плотности) раствора при оценке ионной силы раствора и коэффициентов активности; автоматизированный подбор необходимых для расчета значений зарядов ионов, теоретических величин радиусов гидратированных ионов и характеристических коэффициентов расчетных уравнений в зависимости от температуры; пересчет физико-химических параметров вод после выпадения одного из минералов; динамическая оценка последовательности выпадения солей в зависимости от изменения температурного фактора. С помощью

Исследуется CaCO ₃			
Расчет по выбранному методу	Расчет по другим методам		
Методика [1]	Стиффа—Дэвиса	Райса—Олдо	В.Е. Кашавцева
Степень насыщения: S=2,72	Индекс насыщения: I _s =0,88 Индекс стабильности: I _{st} =4,9	Индекс насыщения: S=4,82	Коэффициент насыщения: S=0,81
Критерий оценки: S > 1	Критерий оценки: I _s > 0,5...0,7 6,4 > I _{st} > 3,7	Критерий оценки: S > 1	Критерий оценки: S < 1
Вывод: Возможно выпадение осадка в виде карбоната кальция	Вывод: Возможно выпадение осадка в виде карбоната кальция	Вывод: Осадок не выпадает	

предлагаемой технологии можно количественно описывать растворение (осаждение) каждой соли в отдельности (выбраны соли, которые чаще всего встречаются при засолонении нефтяных коллекторов и применительно к которым существует технология ингибирования) и совместное растворение солей различных типов с учетом последовательности выпадения солей, моделировать влияние изменений термобарических факторов, подбирать оптимальный состав техногенной воды, пропорции ее смешения с пластовой водой, учитывать выпадение конденсационных и возрожденных вод в пласте, изменение парциального давления кислот газобразных компонентов в водной среде и, соответственно, pH среды.

Предлагаемая технология повышает скорость и точность прогноза процесса выпадения солей в достаточно широком диапазоне изменения параметров геологической среды, приемлема для решения как геологических, так и промысловых задач.

Дальнейшее развитие метода математического моделирования процессов выпадения (растворения) солей при эксплуатации нефтяных месторождений зависит от ряда факторов. Назовем самые важные.

1. 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 составляющие. Учитывая это, надо признать, что разработка физико-химических и математических методов оценки масштабов выпадения органических и металлоорганических комплексов из природных и техногенных вод — одна из важнейших задач данного направления.

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

3. Обеспечение расчетов надежными термодинамическими критериями позволит решить и проблему расширения числа исследуемых минералов. Традиционно расчет ведется только по наиболее известным минералам. В то же время известно, что на месторож-

дениях распознается значительно более широкий спектр минералов (тахигидрит, бароцелестин, халцедон и др.).

4. Необходима дальнейшая проработка вопроса по оценке качества исходного материала. Как справедливо отмечает В.Д. Порошин, критерии отбраковки некачественных данных для различных геологических регионов не могут быть одинаковыми.

5. 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 и борьбы с солеотложением на нефтепромыслах [6], целесообразно организовать системы гидрохимического мониторинга на всех действующих промыслах.

6. Необходимо продолжить работы по совершенствованию отдельных блоков алгоритма. В частности, заслуживает более тщательной проработки вопрос оценки динамики и последствий смешения вод различного состава.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Исаева Г. Ю. Разработка методики и модели компьютерного прогнозирования процесса солеотложения в нефтяных пластах при заводнении: Автореф. дис... канд. техн. наук. — М., 2000.
3. Кацавцев В.Е., Гаттенбергер Ю.П., Люшин С.Ф. Предупреждение солеобразования при добыче нефти. — М.: Недра, 1985. — 215 с.
4. Крайнов В.М., Швец В.М. Гидрогеохимия. — М.: Недра, 1992. — 462 с.
5. 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.
6. Потапов С.С. К проблеме солеотложения в нефтепромысловом оборудовании "ЛУКойл—Когалымнефтегаз" // *Уральский минералогический сборник.* — 1997. — № 7. — С. 233—249.
7. *Справочник по растворимости.* — Л.: Наука, 1970. — 653 с.