Геология
Geology

УДК 55.556

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЛАСТОВЫХ ВОД В ПРОЦЕССЕ НЕФТЕДОБЫЧИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.М.СУДАРИКОВ, *д-р геол.-минерал. наук, профессор, sergei_sudarikov@mail.ru*
Е.Н.ЛЕОНТЬЕВА, *аспирантка, saveleva.spmi@gmail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены гидрогеохимические процессы, протекающие в продуктивных пластах при разработке нефтяных месторождений. Проанализировано влияние заводнения на изменение химического состава пластовых вод и возможное солеобразование. Использован метод компьютерного термодинамического моделирования физико-химических процессов для прогнозирования солеотложения на нефтяных месторождениях.

Ключевые слова: солеотложение, пластовые воды, гидрогеохимические процессы, моделирование.

Отложение неорганических солей при эксплуатации скважин является одной из основных проблем в решении задачи повышения эффективности добычи нефти. В настоящее время многие нефтяные месторождения страны находятся в состоянии интенсивного обводнения, с которым связано образование солей в скважинах. Это характерно и для Удмуртии, где основные месторождения находятся на завершающей стадии разработки и заводнение залежей является технологической основой их эксплуатации. При этом важно знать, как меняет свой химический состав закачиваемая в залежь вода при взаимодействии с породой пласта-коллектора и пластовыми жидкостями.

Солеобразование при разработке залежей нефти – достаточно сложный процесс, обусловленный как природными, так и техногенными факторами. При заводнении химический состав добывающих скважин меняется в диапазоне минерализаций от закачиваемой до пластовой воды и не является результатом их простого смешения в свободном объеме [1]. Закачка пресных вод в нефтяной пласт приводит к образованию многокомпонентной системы «закачиваемая вода – пластовая вода – погребенная вода – нефть с растворенным газом – породы пласта». В результате процессов, протекающих внутри пласта, в попутной воде увеличиваются концентрации ионов, потенциально способных к образованию солей. В результате термобарических изменений и смешения химически несовместимых вод из пересыщенных солями растворов происходит выпадение неорганических осадков. При определенных условиях пересыщенные солями растворы могут долгое время оставаться стабильными, не проявляя склонности к осадкообразованию, однако под воздействием явления, нарушающего равновесие солевого раствора, образуются осадки солей. Этому могут способствовать, например, попадание механических примесей и продуктов коррозии, которые становятся центрами кристаллизации, различные химические обработки. На отложение солей могут оказывать влияние и технологические особенности разработки залежей, например активность системы заводнения с повышенным давлением нагнетания [2].

Основными компонентами большинства отложений являются карбонат кальция, сульфат кальция и (или) сульфат бария. Отложения чистых сульфата или карбоната кальция встречаются редко, обычно они представляют собой смесь одного или нескольких основных неорганических компонентов с продуктами коррозии, частицами песка, причем отложения пропитаны или покрыты асфальто-смоло-парафиновыми веществами.

Поскольку бороться с последствиями солеотложения довольно трудно, а некоторые осадки сложного состава удалить практически невозможно, целесообразно проводить прогнозирование выпадения солей при различных условиях эксплуатации в целях предупреждения этого явления. Чаще всего прогнозирование осуществляется аналитически для конкретных объектов и условий на основе гидрохимических расчетов. Одним из видов аналитического прогнозирования является термодинамическое моделирование физико-химических процессов в природных водных растворах, в основе которого лежат законы равновесной термодинамики. Моделирование позволяет рассчитывать формы нахождения элементов в водных растворах и состояния насыщения растворов и таким образом решать широкий круг технологических задач, связанных с прогнозированием солеотложения.

Специфика и приемы прогнозирования зависят от типа солевых отложений, места образования солей (пласт, скважина, оборудование), технологии разработки залежей и других факторов.

Для прогнозирования солеотложения вследствие изменения химического состава пластовых вод методом термодинамического моделирования физико-химических условий были проанализированы гидрогеохимические процессы на Мишкинском нефтяном месторождении (Республика Удмуртия). Полученные результаты сравнивались с результатами аналитических расчетов по наиболее распространенным методикам (А.Ю.Намиота, Дж.Е.Оддо и М.В.Томсона, А.И.Чистовского, Ф.С.Гарифуллина) и с промысловыми данными [1, 4].

Подземные воды в пределах Мишкинского месторождения, как и на всей территории Удмуртии, приурочены ко всему разрезу осадочного чехла [3]. Продуктивными являются пласты верейского горизонта, башкирского яруса, тульского и бобриковского горизонтов (яснополянского надгоризонта) и турнейского яруса. Пластовые воды являются высокоминерализованными рассолами хлор-кальциевого типа (по Сулину) с промышленным содержанием йода и брома, плотностью 1,17 г/см^3, с очень низким содержанием гидрокарбонатов и сульфатов. Замеры концентрации водородных ионов pH единичные, значения близки к нейтральным, сдвинуты в сторону кислой среды. Все объекты месторождения разрабатываются с применением искусственного поддержания пластового давления. Водозабор для поддержания пластового давления расположен на р. Сива, протекающей по территории месторождения. Вода в реке пресная (минерализация 0,33 г/дм^3), гидрокарбонатная кальциевая, мягкая, в небольших количествах присутствуют нефтепродукты, железо и нитраты.

Для прогнозирования изменения химического состава пластовых вод и определения возможного химического состава механических примесей и отлагающихся солей в нефтеносных пластах Мишкинского месторождения в программе PHREEQC (version 3) были созданы модели процессов, протекающих при закачивании пресных вод в продуктивные горизонты и смешении закачиваемых вод с пластовыми.

Программа PHREEQC может быть использована для моделирования лабораторных экспериментов или различных химических реакций и процессов в природных водах. Для моделирования возможных вариантов солеотложения необходимо учесть в определенной последовательности процессы, протекающие как в водотоке в поверхностных условиях, так и в смеси двух типов вод в пластовых условиях [5].

1. Закачиваемые пресные поверхностные воды попадают в пластовые условия. Происходит смена окислительной среды на восстановительную, слабощелочной обстановки на слабокислую, низкие давление и температура сменяются высокими. При закачке пресных вод в нагнетательные скважины попадают бактерии, способные развиваться на забое и в призабойной зоне пласта.

2. Взаимодействие закачиваемых вод с вмещающими породами (выщелачивание ангидрита и гипса, содержащихся в терригенном коллекторе, окисление пирита) в пласте, приводит к увеличению концентрации сульфат-ионов в воде. Наличие органического субстрата и сульфатов при незначительном содержании кислорода является природной экосистемой, благоприятной для роста и жизнедеятельности сульфатвосстанавливающих бактерий, продуцирующих сероводород. Приток ионов железа происходит из закачиваемой воды и за счет геохимических процессов взаимодействия пирита минералов с кислородом воздуха в закачиваемой воде.

3. Внутрипластовое смешение закачиваемых вод с повышенным содержанием сульфат-ионов с пластовыми водами хлор-кальциевого типа приводит к выпадению гипса. Взаимодействие сероводорода с ионами железа ведет к образованию осадков сульфида железа.

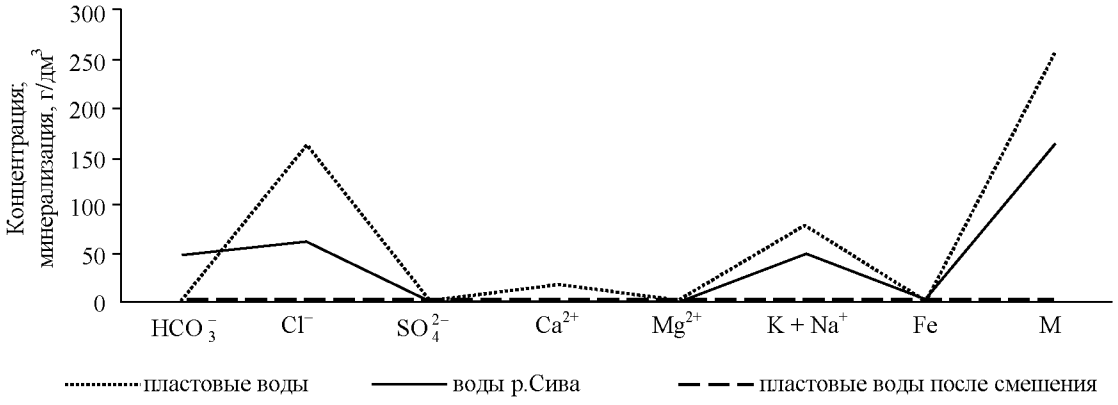
4. В пластовых условиях с высокой температурой и при отсутствии углекислого газа возможно выпадение в осадок кальцита, образующегося при смешении химически несовместимых вод.

Используя данные по химическому составу пластовых и закачиваемых вод, термобарическим, окислительно-восстановительным и кислотно-щелочным условиям протекания процессов, минеральному составу кернов пород продуктивных горизонтов, с помощью моделирования в программе PHREEQC можно определить состав попутно-добываемых вод и оценить вероятность выпадения различных солей.

С помощью модели можно судить об изменении химического состава пластовых вод в ходе эксплуатации месторождения (см. рисунок). Пластовые воды в ходе заводнения в значительной степени опресняются, концентрации хлоридов и ионов натрия снижаются, а количество гидрокарбонат-ионов увеличивается. Концентрации сульфатов, ионов кальция, магния меняются незначительно. Кроме того, увеличивается концентрация железа, которое в полученном растворе присутствует в форме Fe^{2+}.

Анализ результатов моделирования для Мишкинского месторождения показывает, что химический состав механических примесей различается в зависимости от объекта разработки, но для всех объектов характерно высокое содержание сульфидов железа (от 47 до 73 % от объема всех примесей). Также в большом количестве присутствуют гипс (от 9 до 20 %) и соли, в основном хлориды (от 6 до 25 % NaCl, от 3 до 5 % $CaCl_2$, от 2 до 4 % $MgCl_2$). Для верейского объекта разработки характерно высокое содержание кальцита (15 %).

Результаты моделирования соответствуют промысловым данным, полученным в течение последних лет разработки, что говорит о достоверности проведенных расчетов. Это также подтверждается и результатами прогнозирования условий начала выпадения солей: по методикам А.Ю.Намиота, Дж.Е.Оддо и М.В.Томсона для карбонатов, по методике А.И.Чистовского для сульфатов и по методике Ф.С.Гарифуллина для сульфида железа.



Сравнение составов смешивающихся пластовых вод башкирского яруса, поверхностных вод и конечного раствора (согласно результатам моделирования)

На основе модели, созданной для анализа процессов смешения пластовых вод и закачиваемых пресных, можно прогнозировать изменение химического состава пластовых вод при дальнейшем заводнении. Для этого в модели необходимо увеличивать долю закачиваемых вод в смеси, а в качестве пластовых вод брать уже измененный раствор. Проведенное моделирование при таких условиях заводнения Мишкинского месторождения показало, что через 10 лет минерализация пластовых вод может снизиться на 68 г/дм^3 (26,6 %), плотность уменьшится на 0,08 г/см^3 (7 %) относительно первоначального состава на период начала заводнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кащавцев В.Е.* Солеобразование при добыче нефти / В.Е.Кащавцев, И.Т.Мищенко. М.: Орбита-М, 2004. 432 с.
2. *Маркин А.Н.* Нефтепромысловая химия: Практическое руководство / А.Н.Маркин, Р.Э.Низамов, С.В.Суховерхов. Владивосток: Дальнаука, 2011. 288 с.
3. *Савельев В.А* Нефтегазоносность и перспективы освоения ресурсов нефти Удмуртской Республики / Институт компьютерных исследований. М. – Ижевск, 2003. 288 с.
4. *Merkel B.J.* Groundwater geochemistry a practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems / B.J.Merkel, B.Planer-Friedrich. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 200 p.
5. *Parkhurst D.L.* Description of input and examples for PHREEQC version 3 – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43 / D.L.Parkhurst, C.A.J.Appelo. 2013. URL: http://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/.

REFERENCES

1. *Kaschavtsev V.E., Mischenko I.T.* Soleobrazovanie pri dobyche nefti (*Salification in oil production*). Moscow: Orbita-M, 2004, p.432.
2. *Markin A.N., Nizamov R.E., Sukhoverkhov S.V.* Neftepromyslovaya khimiya: Prakticheskoe rukovodstvo (*Oilfield chemistry: a practical guide*). Vladivostok: Dalnauka, 2011, p.288.
3. *Savel'ev V.A.* Neftegazonosnost' i perspektivy osvoeniya resursov nefti Udmurtskoi Respubliki (*Petroleum potential and prospects of development of the Udmurt Republic oil resources*). Institut komp'yuternykh issledovanii. Moscow – Izhevsk, 2003, p.288.
4. *Merkel B.J., Planer-Friedrich B.* Groundwater geochemistry a practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems. (*Groundwater geochemistry a practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems*). Berlin: Springer-Verlag, 2005, p.200.
5. *Parkhurst D.L., Appelo C.A.J.* Description of input and examples for PHREEQC version 3 – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 2013. Available at: http://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/.

FORECASTING CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF RESERVOIR WATERS IN THE COURSE OF OIL PRODUCTION ACCORDING TO THE RESULTS OF THERMODYNAMIC MODELLING

S.M.SUDARIKOV, *Dr. of Geological & Mineral Sciences, Professor, sergei_sudarikov@mail.ru*
E.N. LEONT'EVA, *Postgraduate student, saveleva.spmi@gmail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The article deals with hydrogeochemical processes in the productive strata in the course of oil field development. The impact of flooding on the change of the chemical composition of reservoir water and the possibility of salification are analyzed. Computer thermodynamic modelling of physico-chemical processes is used for prediction of salification in oil fields.

***Key words*:** salification, reservoir waters, hydrogeochemical processes, modelling.