УДК 556.314(925.12)

И.И.ЮРЧИК
Томский политехнический университет

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД РАЗНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ТИПОВ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ (НА ПРИМЕРЕ ЮРУБЧЕНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)

Рассмотрены гидрогеохимические особенности строения Юрубчено-Тохомского лицензионного участка. Показаны результаты численного физико-химического моделирования поведения различных химических типов вод в процессе закачки в продуктивные пласты. Сформулированы рекомендации по использованию природных вод различных химических типов для поддержания пластового давления в условиях Сибирской платформы на примере Юрубченского месторождения.

Hydrogeochemical characteristics of the Yurubcheno-Tokhomskoe license area morphology are studied. The results of numerical physical and chemical model studies are given which describe behaviour of different chemical water types in the water injection process. Recommendations are formulated on application of different chemical types of natural water to maintain reservoir pressure in conditions of the Siberian platform on the example of the Yurubchenskoe oil-and-gas field.

Целью работы было изучение взаимодействия природных вод Сибирской платформы различных химических типов с высокоминерализованными пластовыми водами и породами месторождений нефти и газа на примере рифейской залежи Юрубченского месторождения. В этой связи задачей исследований стало проведение численного физико-химического моделирования поведения различных химических типов вод в процессе закачки их в продуктивные пласты.

Процессы добычи нефти часто сопровождаются отложением твердых осадков неорганических веществ. В составе осадков преобладают сульфаты кальция, бария и стронция (гипс, ангидрит, барит, целестин), карбонаты кальция и магния (кальцит, доломит, магнезит), хлориды натрия (галит), минералы кремния (кварц, халцедон) и др. Вторичное минералообразование в системе поддержания пластового давления (СППД) может привести не только к выводу из строя дорогостоящего оборудования, трудоемким ремонтным работам, но и к изменению коллекторских свойств пласта. В связи с этим актуальным является изучение процессов солеотложения при использовании СППД.

Юрубченское нефтегазоконденсатное месторождение, открытое в 1982 г., расположено в 145 км юго-восточнее пос.Байкит. Приурочено к одноименному поднятию выступа дорифейского кристаллического фундамента Камовского свода Байкитской антеклизы. Нефтегазоносность связана в основном с эродированной поверхностью карбонатных осадочных образований рифейского возраста на глубине 2,2-2,4 км, предположительно массивного типа, достигает 120-130 м. Наиболее высокое залегание кровли находится на отметке примерно –1940 м, а газо- и водонефтяные контакты принимаются условно на отметках –2030 и –2070 м соответственно. Продуктивны органогенно-доломитовые породы усть-куюмбинской свиты среднего рифея и песчаные горизонты оскобинской и ванаварской свит венда. Залежи в рифее пластовые, массивные, с размытым сводом, экранированные глинисто-карбонатными породами оскобинской свиты венда.

Вторичная открытая пористость составляет от 0,80 до 5-12 %, проницаемость 0,001-0,12 мкм^2. Пластовое давление 22,5 МПа, t = 31 °С. Начальные дебиты нефти 40-150 т/сут, газа – до 250 тыс.м^3/сут и более. Вендские газоконденсатные залежи пластовые, сводовые, литологически экранированные, с газоводяным контактом на отметке –2015 м. Коллектор поровый, пористость песчаников в среднем 15 %, проницаемость 0,5 мкм^2, газонасыщенная толщина 0,6-3,4 м, содержание конденсата до 164,1 г/см^3. По плотности и составу газ и конденсат рифейских и вендских залежей идентичны.

Гидрогеологическое строение Юрубчено-Тохомского лицензионного участка и состав природных вод, использованых для моделирования, изучены в ИГНГ СО РАН и отражены в таблице.

Обобщенная гидрогеохимическая стратификация

Возраст	Ярус, свита	Комплекс	Состав вод, использованных для моделирования
Надсолевая формация и поверхностные воды			
P-N-Q	–	Палеоген-четвертичный	р.П.Тунгуска, речная вода O-Q $0{,}276\frac{(HCO_3)^-63{,}07Cl^-28{,}10(SO_4)^{2-}4{,}50OH^-3{,}27Br^-1{,}05}{Na^+50{,}73Ca^{2+}35{,}18Mg^{2+}13{,}39K^+0{,}69}$. Меженный период
T	Учамская, тутончанская	Верхнепалеозойско-триасовый	Источник (бм-114) T $0{,}486\frac{(HCO_3)^-48{,}05(SO_4)^{2-}28{,}27Cl^-23{,}16OH^-0{,}32Br^-0{,}19}{Mg^{2+}34{,}68Ca^{2+}32{,}76Na^+30{,}42K^+2{,}14}$. Правый берег р.П.Тунгуска, в 2-3 км ниже с.Куюмба
O	Байкитская Чуньская Пролетарская	Ордовикский	Источник (бм-7610) O bk $0{,}448\frac{(HCO_3)^-44{,}75Cl^-39{,}52(SO_4)^{2-}15{,}53OH^-0{,}21}{Ca^{2+}45{,}01Mg^{2+}35{,}87Na^+17{,}07K^+2{,}06}$. Руч.Байкитик, выше пос.Байкит, вблизи устья безымянного левого притока
$Є_{2-3}$	Эвенкийская, оленчиминская	Надсолевой	Источник (459-У) Є3 ev $1{,}213\frac{(SO_4)^{2-}73{,}76(HCO_3)^-23{,}61Cl^-2{,}59}{Ca^{2+}58{,}59Mg^{2+}33{,}45Na^+7{,}96}$, р.Тайга, среднее течение К-СТ-9-40 гл 40 Є2-3 ev $45{,}906\frac{Cl^-91{,}43(SO_4)^{2-}8{,}38(HCO_3)^-0{,}16}{Na^+83{,}82Ca^{2+}10{,}40Mg^{2+}4{,}91K^+0{,}88}$. Источник (бм-113) Є2-3 ev $131{,}185\frac{Cl^-97{,}07(SO_4)^{2-}2{,}82}{Na^+95{,}67Ca^{2+}2{,}89Mg^{2+}0{,}80K^+0{,}64}$. Правый берег р.П.Тунгуска, в 3 км ниже с.Куюмба

Окончание таблицы

Возраст	Ярус, свита	Комплекс	Состав вод, использованых для моделирования
Соленосная формация			
$Є_{1-2}$	Литвинцевская	Ангарско-литвинцевский	Км-3 инт 1366-1443 Є1 bel1 $350{,}812\frac{Cl^{-}99{,}06Br^{-}0{,}70(HCO_3)^{-}0{,}16}{Ca^{2+}42{,}38Na^{+}39{,}60Mg^{2+}11{,}44K^{+}6{,}02Sr^{2+}0{,}56}$
$Є_1$	Ангарская		
	Булайская	Булайский	
	Бельская	Бельский	
	Усольская	Усольский	Бк-1 инт 2725-2813 Є1 us (os) $471{,}097\frac{Cl^{-}98{,}99Br^{-}0{,}97}{Ca^{2+}65{,}48Mg^{2+}13{,}21Na^{+}11{,}78K^{+}8{,}09Sr^{2+}1{,}43}$, Км-4 инт 1990-2005 Є1 us (os) $391{,}896\frac{Cl^{-}98{,}85Br^{-}0{,}89(HCO_3)^{-}0{,}20}{Ca^{2+}49{,}99Na^{+}31{,}62Mg^{2+}10{,}39K^{+}7{,}11Sr^{2+}0{,}89}$.
Подсолевая формация			
V-$Є_1$	Тэтэрская	Карбонатный	Юр-18 инт 2379-2389 R jr $208{,}522\frac{Cl^{-}98{,}81Br^{-}0{,}79(SCO_4)^{2-}0{,}40}{Na^{+}58{,}40Ca^{2+}28{,}10Mg^{2+}11{,}29K^{+}2{,}06Sr^{2+}0{,}14}$.
V	Собинская		
	Катангская		
	Оскобинская	Терригенно-сульфатно-карбонатный	
	Ванаварская	Терригенный	
R_3	Ирэмэкэнская, токурская	Рифейский	
	Вингольдинская, рассолкинская		
R_2	Юктенская, копчерская		
	Куюмбинская		
	Долгоктинская, юрубченская		
	Мадринская, вэдрэшевская		
R_1	Зелиндоконская		

Моделирование осуществлялось с использованием программного комплекса HydroGeo (ПК HG32)*. Реализованные в ПК HG32 гидрогеологические расчеты условно объединены в три группы:

- вспомогательные, предназначенные для оценки фильтрационно-емкостных свойств пород, пересчетов данных по химическому составу воды, газа, минеральной фазы и др.;
- прямого расчета и оптимизации объектов добычи и подземного захоронения вод на основе аналитических методов;
- имитационного моделирования геофильтрации и геомиграции, включая физико-химическое моделирование геохимических процессов, изменяющих вещественный

* *Букаты М.Б.* Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Изв. Томского политехн. ун-та. 2002. Т.305. Вып.6. С.348-365.

состав подземных вод и вмещающих пород, на численных 0-, 1- и 2-мерных моделях.

Моделирование включало пересчет анализов основных типов вод при лабораторных условиях (восстановление баланса электронейтральности и устранение начального пересыщения из-за возможных погрешностей анализа), изменение PT-условий на пластовые – перевод растворов в пластовые условия (имитация «перемещения» раствора на забой) и смешение закачиваемых вод с пластовой водой. После каждого из этих шагов моделировалось выпадение минералов, в отношении которых возникало пересыщение раствора или смеси, и взаимодействие смеси с условной породой пласта.

Исходя из имеющихся анализов и ожидаемого состава выпадающих и растворяющихся минералов, в систему моделирования были включены ионы H^+, Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Sr^{2+}, OH^-, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, Br^-, SiO_2^0, H_2O, CO_3^{2-} и CO_2^0, а также минералы: галит NaCl, ангидрит $CaSO_4$, гипс $CaSO_4(H_2O)_2$, целестин $SrSO_4$, доломит $CaMg(CO_3)_2$, кальцит $CaCO_3$, стронцианит $SrCO_3$, магнезит $MgCO_3$ и кварц SiO_2.

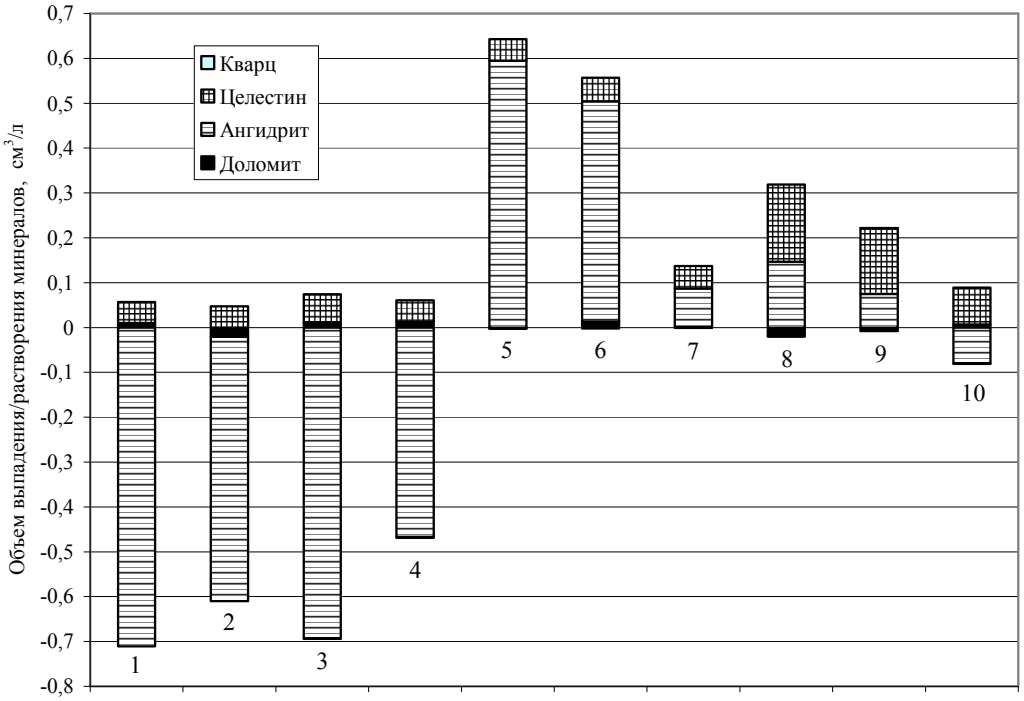
В качестве «лабораторных» PT-условий принимались 22 °C и 0,1 МПа, а в качестве пластовых – 31 °C и 22,5 МПа. Порода продуктивного пласта задавалась состоящей из доломита, ангидрита и кварца в соотношении по объему соответственно 94 : 5 : 1 %, при пористости 5 %, что приблизительно отвечает усредненному составу реальных пород рифея.

Выполненные расчеты показывают, что закачка любых из использованных при моделировании растворов приводит к развитию тех или иных гидрогеохимических процессов, которые должны быть учтены при обосновании выбора рабочего агента ППД. В рассматриваемых условиях среди всех изученных минералов в процессах участвовали только доломит, ангидрит, целестин и кварц. Изменений в отношении других минералов расчеты не выявили.

На рисунке видно, что при закачке речной воды хлоридно-гидрокарбонатного кальциево-натриевого состава в продуктивных пластах развиваются растворение ангидрита (2,13 г/л, что соответствует около 0,7 $см^3$ на каждый литр закачанной речной воды) и высаживание из смесей с пластовой водой доломита и целестина (до 0,01 и 0,05 $см^3$/л соответственно).

Близкие результаты дает закачка в продуктивные пласты пресных гидрокарбонатно-сульфатных магниево-кальциево-натриевых вод (растворение ангидрита и кварца до 0,47 и 0,002 $см^3$/л соответственно) либо гидрокарбонатно-хлоридных кальциево-магниевых (растворение ангидрита и кварца до 0,69 и 0,001 $см^3$/л и выпадение доломита и целестина 0,01 и 0,063 $см^3$/л соответственно) и солоноватых сульфатных кальциево-магниевых подземных вод (растворение ангидрита и кварца – до 0,47 и 0,002 $см^3$/л, выпадение доломита и целестина – до 0,014 и 0,047 $см^3$/л соответственно), заполняющих верхние горизонты разреза, сложенного породами триасового, ордовикского и верхне- и среднекембрийского возраста (см. рисунок). От речной воды такие воды отличаются заметно меньшей агрессивностью в отношении ангидрита (при этом последняя частично компенсируется замещением ангидрита целестином), а также практическим отсутствием высаживания из смесей кремнезема и неоднозначным, но также слабым взаимодействием с карбонатами.

Нагнетание слабых хлоридных натриевых рассолов выщелачивания, заполняющих горизонты нижней части надсолевой формации в зонах замедленного и весьма замедленного водообмена, сопровождается, в отличие от пресных и солоноватых вод, уже не ростом, а снижением емкости и проницаемости коллекторов за счет высаживания сульфатов кальция (1,79 г/л, или 0,6 $см^3$/л) и стронция (0,2 г/л, или 0,5 $см^3$/л). Причем с ростом минерализации сильносоленых вод и рассолов выщелачивания эта тенденция возрастает, достигая уже в слабых рассолах примерно 0,6-0,7 $см^3$ потери пустотности в результате закачки 1 л воды. При этом карбонатные минералы на разных стадиях взаимодействия могут в небольших количествах как высаживаться, так и растворяться, а кварцевый цемент преимущественно слабо растворяется.



Суммарные объемы выпадения / растворения минералов
1 – речная вода, минерализация M = 0,276 г/л; 2 – PZ3-T, M = 0,486; 3 – O bk, M = 0,448;
4 – Є3 ev, M = 1,213; 5 – Є2-3 ev, M = 23,335; 6 – Є2-3 ev, M = 131,185; 7 – Є1 bel1, M = 350,812;
8 – Є1 us (os), M = 471,097; 9 – Є1 us (os), M = 391,896; 10 – смесь рассолов Є1 bel1, M = 350,812 (80 %)
и вод O bk, M = 448 (20 %)

Ухудшение коллекторских свойств пород существенно меньше при использовании в качестве агента заводнения метаморфизованных хлоридных натриево-кальциевых и кальциевых рассолов соленосной формации. Кварц и доломит в этом случае преимущественно растворяются смесями нагнетаемых и пластовых вод. Ангидрит на фронте вытеснения пластовой воды (при высоких ее содержаниях в смеси) замещается целестином, который в этой зоне также осаждается самостоятельно, тогда как в зоне нагнетания (при преобладании в смеси вод нагнетания) наблюдается осадка ангидрита и отсутствие высаживания или растворения целестина. Несколько неожиданно, что галит при моделировании нигде не выпадает, что, видимо, связано с ростом растворимости этого минерала при повышении температуры (при нагнетании это всегда именно так).

Таким образом, с точки зрения растворения/осаждения минералов в результате закачки в продуктивные пласты различных природных вод предпочтительными являются метаморфизованные рассолы межсолевых карбонатных горизонтов, хотя их нагнетание и сопровождается выпадением из раствора некоторого количества сульфатных минералов. Кроме того, эти рассолы среди всех других типов природных вод обладают наиболее высокой нефтеотмывающей способностью. При этом из полученных данных очевидно, что вторичное сульфатообразование может быть в значительной мере снижено, а возможно и полностью компенсировано, если эти рассолы до закачки разбавить речной водой или водами зоны активного водообмена низкой минерализации (пресными и/или солоноватыми). Проведенное в этой связи дополнительное моделирование показало, что если, например, к 80 частям рассола нижнебельского горизонта (проба из скв. Км-3) добавить 20 частей пресной воды из горизонта байкитский свиты (проба 7610), то результирующий раствор станет практически инертным агентом нагнетания.

Научный руководитель д.г.-м.н. проф. *М.Б.Букаты*