

УДК 622.76:[622.031::550.84]

Оценка константы скорости растворения галита в открытом объеме и в пористой среде

А.В. Богданов^{1*}, Т.А. Исмаилов²

¹ ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, с.п. Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

² РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 65, к. 1

* E-mail: A_Bogdanov@vniigaz.gazprom.ru

Ключевые слова: нефтяная залежь, засоленное месторождение, гидродинамическое моделирование, экспериментальные исследования, пористая среда, константа скорости реакции, растворение галита.

Тезисы. При разработке нефтяных залежей засоленных месторождений путем закачки в коллектор слабоминерализованной воды происходит растворение солей, ставших частью скелета породы. Для достоверного учета влияния рассоления на разработку таких залежей при гидродинамическом моделировании необходимо учитывать кинетику этого процесса. Прежде всего следует использовать адекватные исследуемым процессам математические модели и дополнить их данными о характерных константах скорости растворения солей. В работе представлены результаты серии экспериментальных исследований по оценке константы скорости реакции для различных режимов и условий растворения. Выполнены экспериментальные исследования растворения галита в открытом объеме в статике, в закрытом объеме при постоянном давлении в статике и в пористой среде в динамике. Исследования процесса растворения соли в пористой среде осложняются наличием пленок нефти на поверхности кристаллов галита, а также тем, что соль заполняет поровое пространство коллекторов неравномерно. Рассмотрен вопрос корректного перехода от описания процесса растворения галита на поверхности (твердая соль – растворитель) к его описанию в объеме пористой среды.

Засоление подсолевых терригенных отложений галитом встречается на многих нефтегазоконденсатных месторождениях Непско-Ботуобинской антеклизы – Чайнинском, Среднеботуобинском, Верхнечонском и других. Структура пустотного пространства и фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) засоленных коллекторов изменяются вследствие растворения находящихся в них твердых солей. Исследования пород с различной степенью засоления показали, что вымывание соли из порового пространства приводит к увеличению пористости и проницаемости породы.

Для достоверного учета влияния рассоления на разработку таких залежей при гидродинамическом моделировании необходимо принимать к сведению кинетику массообмена между водным раствором и породой [1]. Основной закон кинетики растворения – плотность потока вещества с поверхности растворения пропорциональна концентрационному недонасыщению раствора:

$$\frac{dM}{dt} = -K_n F (C_n - C), \quad (1)$$

где M – масса растворенного вещества, кг; t – время, с; C – текущая концентрация соли в основном объеме растворителя, кг/м³; C_n – концентрация насыщения, кг/м³; F – поверхность растворения (площадь поверхности пор, занимаемых солями), м²; K_n – константа скорости поверхностной реакции, м/с.

Чаще всего скорость межфазного перехода высока, поэтому у поверхности растворения формируется слой насыщенного раствора, откуда вещество диффундирует через пристеночный слой в основной объем растворителя. Константа скорости поверхностной реакции в этом случае приблизительно равна коэффициенту массоотдачи:

$$K_n \approx \beta_{m.o} = \frac{D_m}{\delta}, \quad (2)$$

где $\beta_{m.o}$ – коэффициент массоотдачи, м/с; D_m – коэффициент молекулярной диффузии, м²/с; δ – толщина диффузионного пристенного слоя, м.

В общем случае сопротивление переходу вещества из твердой фазы в раствор складывается из двух составляющих:

$$\frac{1}{K_{\Pi}} = \frac{1}{K_{\text{м.п}}} + \frac{1}{\beta_{\text{м.о}}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{м.п}}$ – константа скорости межфазного перехода, м/с.

При больших скоростях межфазного перехода, т.е. когда $\frac{1}{K_{\text{м.п}}} \ll \frac{1}{\beta_{\text{м.о}}}$, реализуется режим диффузионного растворения; если

$$\frac{1}{K_{\text{м.п}}} \gg \frac{1}{\beta_{\text{м.о}}}, \text{ скорость процесса лимитируется}$$

межфазным переходом. Константа $K_{\text{м.п}}$ зависит от температуры и не зависит от гидродинамической обстановки. Коэффициент $\beta_{\text{м.о}}$ повышается с увеличением температуры, так как увеличивается $D_{\text{м}}$, снижается вязкость жидкости и уменьшается δ . Вместе с тем $\beta_{\text{м.о}}$ существенно зависит от гидродинамической обстановки, поскольку

$$\delta \approx \frac{l}{\sqrt{\text{Re}}}, \quad (4)$$

где l – характеристический размер твердого тела; Re – критерий Рейнольдса.

Переход от поверхностных процессов к растворению в объеме описывается следующим выражением:

$$\frac{dM}{dt} = -K_{\text{р}} S_{\text{р}} V_{\text{пор}} (C_{\text{н}} - C), \quad (5)$$

где $V_{\text{пор}}$ – объем пор, м³; $S_{\text{р}}$ – насыщенность порового пространства раствором, д. ед.; $K_{\text{р}}$ – константа скорости растворения, с⁻¹, которая выражается через константу $K_{\text{н}}$ в следующем виде:

$$K_{\text{р}} = \frac{K_{\text{н}} F}{S_{\text{р}} V_{\text{пор}}}. \quad (6)$$

Для нахождения $K_{\text{р}}$ предлагается использовать метод Аврамы – Колмогорова – Ерофеева [2]. Суть метода состоит в построении кинетической кривой растворения и ее аппроксимации функцией вида

$$f(t) = 1 - e^{-kt^n}, \quad (7)$$

где k – постоянная; n – характеризует скорость реакции.

Константа скорости растворения $K_{\text{р}}$ определяется из соотношения Саковича [3]:

$$K_{\text{р}} = nk^{\frac{1}{n}}. \quad (8)$$

При $n > 1$ скорость протекания реакции растворения контролируется кинетическим процессом; при $n = 1$ скорость реакции сопоставима со скоростью диффузии (реакция 1-го порядка); при $n < 1$ скорость реакции контролируется диффузией вещества в растворе. Кинетическая кривая строится как зависимость степени растворения (α) от времени t . Степень растворения α в свою очередь определяется отношением M (в данном случае массы соли) к начальной массе вещества в образце.

Экспериментальные исследования

Так, выполнены эксперименты двух видов: 1) в статике – в свободном объеме; 2) в динамике – в пористой среде.

В первой серии экспериментов в открытый цилиндрический сосуд объемом 569 см³ было помещено 108 г галита и 500 см³ дистиллированной воды. В течение 70 сут производились измерения концентраций раствора на различных расстояниях от поверхности твердой соли. Контроль осуществлялся специальным щупом и высокоточным омметром. Концентрация соли определялась пересчетом замеренных значений сопротивления. Графики на рис. 1 характеризуют динамику изменения концентрации соли в растворе за время проведения эксперимента.

По результатам эксперимента кинетические кривые построены двумя способами: 1) по изменению толщины твердой соли и 2) по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) раствора (рис. 2). Анализ методом Аврамы – Колмогорова – Ерофеева показал сходимость результатов: значение $K_{\text{р}}$ по толщине твердой соли составило $6,1 \cdot 10^{-3}$ сут⁻¹, по профилю УЭС – $9,4 \cdot 10^{-3}$ сут⁻¹.

В программном пакете MathWorks MATLAB произведен расчет модели одномерной диффузии галита в воде (рис. 3). Для расчета использовалась явная 4-точечная схема с заданием шага по пространству и поиску шага по времени с учетом правила проверки устойчивости фон Неймана [4, с. 58; 5, с. 98–103].

Во второй серии экспериментов кинетика рассолонения исследовалась при моделировании вытеснения нефти 3%-ным раствором

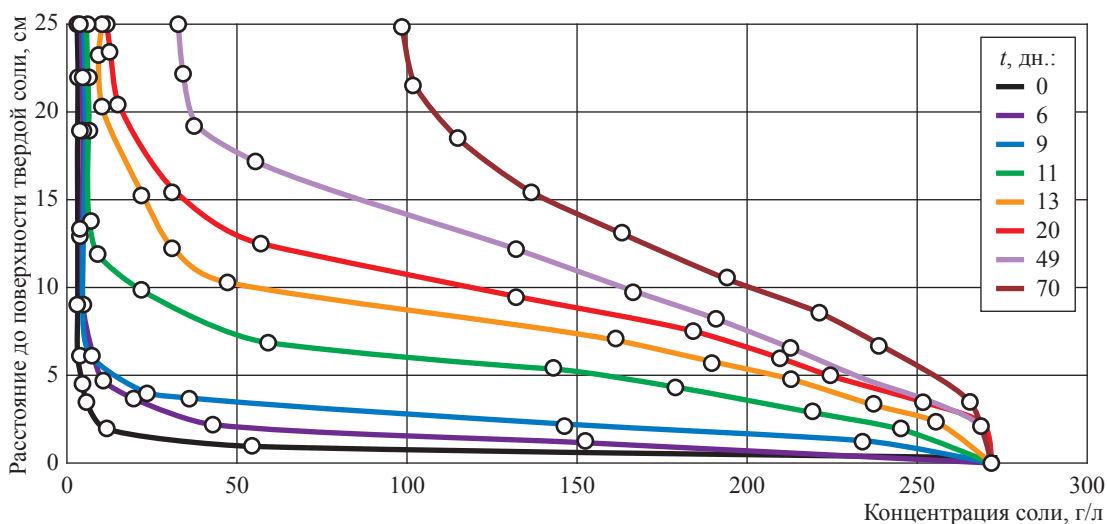


Рис. 1. Динамика изменения концентрации соли в растворе в зависимости от расстояния до поверхности твердой соли

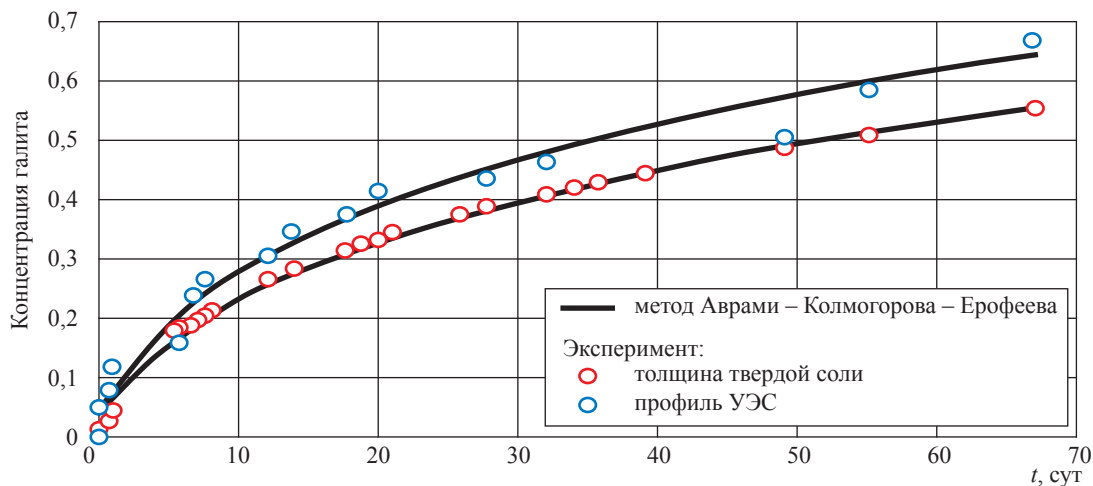


Рис. 2. Кинетические кривые растворения галита

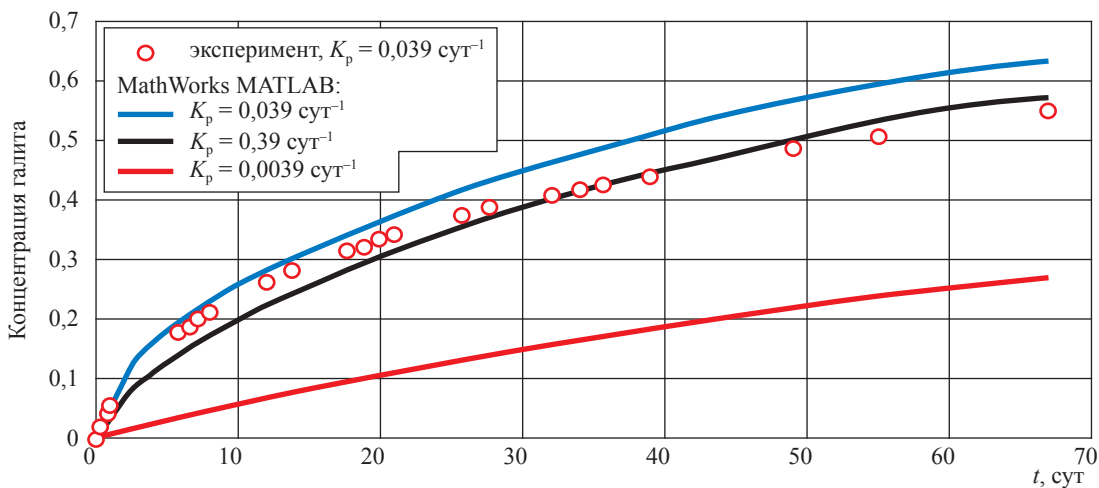


Рис. 3. Кинетические кривые растворения галита: рассолонение при атмосферном давлении; $C_n = 300 \text{ кг/м}^3$; $D_m = 1,8 \text{ см}^2/\text{сут}$

NaCl в воде на моделях пласта, представленных образцами пород-коллекторов Чайнинского месторождения. В качестве модели нефти использовался декан (C₁₀H₂₂). Эксперименты про-

водились на установке двухфазной фильтрации (рис. 4) при термобарических условиях, приближенных к пластовым на Чайнинском НГКМ.

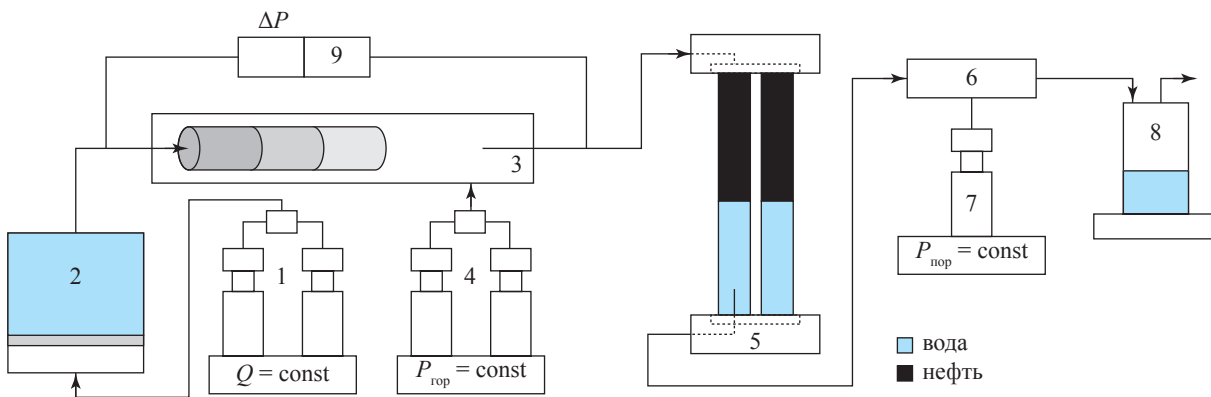


Рис. 4. Схема экспериментальной установки двухфазной фильтрации:

- 1 – блок насосов фильтрации для поддержания заданных постоянных расходов воды Q или давления P ;
- 2 – аккумулятор с водой; 3 – кернодержатель; 4 – система поддержания горного давления $P_{гор}$;
- 5 – ультразвуковой двухфазный сепаратор высокого давления; 6 – регулятор давления BPR;
- 7 – насос поддержания пластового давления $P_{пор}$; 8 – накопительная емкость на выходе (слив);
- 9 – измерительная система для определения дифференциального давления ΔP на модели пласта

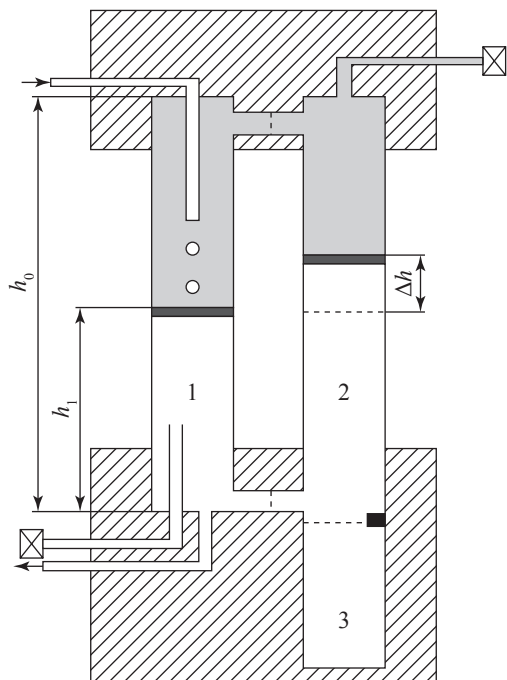


Рис. 5. Схема акустического сепаратора:

- 1 – камера, где происходит смешивание флюидов; 2 – камера, где происходит регистрация положения мениска «вода/декан» с помощью ультразвукового импульса;
- 3 – калибровочная камера, где происходит определение скорости звука в водяной фазе

В начале эксперимента полностью насыщенные деканом образцы керна загружались в установку в порядке ухудшения ФЕС по направлению движения потока. Затем при комнатной температуре 22–23 °С создавались пластовые барические условия ($P_{гор} = 50$ МПа, $P_{пор} = 12$ МПа). Далее на вход модели подавалась ($Q = 0,005–0,1$ см³/мин) слабуминерализованная вода (3%-ный раствор NaCl). Нефть из кернодержателя вытеснялась водой в акустический сепаратор (рис. 5), работавший в режиме «сбора легкой фазы», т.е. смесь поступала в верхнюю часть сепаратора, а удаление лишней массы воды происходило снизу.

Согласно методу Аврамы – Колмогорова – Ерофеева скорость реакции контролируется диффузией вещества в растворе, а не кинетическим процессом (табл. 1). Аппроксимация экспериментальных данных выполнена в рамках закона Амага с учетом баланса воды, соли, нефти, кинетики расслоения и соблюдения условия несжимаемости флюидов и керна.

Результаты определения K_p , полученные двумя способами, сведены в табл. 2.

Таблица 1

Результаты фильтрационных экспериментов:
 m_0 – открытая пористость, %; K_0 – абсолютная проницаемость, мД

№ эксперимента	Исходная концентрация соли в образце, %	Q , см ³ /мин	До расслоения		После расслоения		$k \cdot 10^{-5}$	n	K_p , сут ⁻¹
			m_0	K_0	m_0	K_0			
1	3,7	0,05	6	14,9	10	666	7	0,8	0,44
2	3,6	0,1	7	52,5	11	593	1	1	0,91
3	3,0	0,05	9,4	5	12,6	12	22	0,6	0,04
4	3,8	0,005	7	4,9	11,1	73	1	0,8	0,07
5	4,3	0,02	6,2	29	10,8	290	1,3	0,9	0,29
6	2,5	0,1	11,9	500	12,2	848	2,55	0,9	0,61
7	0,8	0,1	11,7	120	12,6	212	26	0,7	0,46

Таблица 2

Результаты определения K_p , сут⁻¹

Опыт в открытом объеме			Опыт в пористой среде		
Метод Аврами – Колмогорова – Ерофеева		MathWorks MATLAB	№ эксп.	Метод Аврами – Колмогорова – Ерофеева	Одномерная модель (в рамках закона Амага)
по толщине твердой соли	по профилю УЭС				
0,0061	0,0094	0,039	1	0,07	2,304
			2	0,44	6,332
			3	0,04	–
			4	0,91	–
			5	0,29	–
			6	0,61	–
			7	0,46	–

Таким образом, разработана и внедрена методика определения кинетической кривой растворения солей в горной породе при фильтрации через нее слабоминерализованной воды, основанная на определении плотности водного раствора, вытекающего из ядерной модели.

Константа скорости растворения галита оценена двумя способами: эмпирическим методом Аврами – Колмогорова – Ерофеева и с помощью численного моделирования. Определенные этими методами значения константы для опыта в открытом объеме отличаются на порядок.

Значение константы скорости растворения галита, полученное для опыта в открытом объеме, на два порядка меньше, чем для опыта в пористой среде. Следует также учесть, что исследования процесса растворения соли в пористой среде осложняются наличием пленок нефти на поверхности кристаллов галита и неравномерностью распределения соли в поровом пространстве.

Список литературы

1. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. К.П. Мищенко и А.А. Равделя. – Л.: Химия, 1974. – 200 с.
2. Ерофеев Б.В. Обобщенное уравнение химической кинетики и его применение к реакциям с участием твердых веществ / Б.В. Ерофеев // ДАН СССР. – 1946. – Т. LII. – № 6. – С. 515–518.
3. Ученые записки Томского государственного университета им. В.В. Куйбышева. – Томск, 1956. – № 26. – С. 103–110.
4. Сухарев М.Г. Основы математического и компьютерного моделирования в задачах нефтегазового комплекса / М.Г. Сухарев, С.С. Арсеньев-Образцов, Т.М. Жукова. – М.: МАКС Пресс, 2010.
5. Пирумов У.Г. Численные методы: теория и практика / У.Г. Пирумов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2012.

Estimation of dissolution velocity for halite in open volume and in porous medium

A.V. Bogdanov^{1*}, T.A. Ismayilov²

¹ Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Est. 15, Proyektiruemyy proezd # 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

² Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Bld. 65, Est. 1, Leninskiy prospect, Moscow, 119991, Russian Federation

* E-mail: A_Bogdanov@vniigaz.gazprom.ru

Abstract. When at development of oil deposits in salinated fields brackish water is pumped into a reservoir, dissolution of salts incorporated in rock matrix occurs. To account dissolution impact for sure, it is necessary to consider kinetics of this process in course of hydrodynamic modelling. First of all, one should apply adequate mathematical models and complete them with data on typical salt reaction constants. The paper presents a number of experimental results concerning with estimation of reaction constants for different modes and conditions of dissolution. The correspondent tests of halite dissolution were carried out in open bulk in statics, in closed bulk under constant pressure in dynamics, and in porous medium in dynamics. Investigation of salt dissolution in porous medium is complicated with oil films covering halite crystals and with the phenomenon of irregular salt dissipation within porous space of reservoirs. Also, a question of correct change from description of halite dissolution on the spot (a solid salt – halite) to description of this process in porous medium is studied.

Keywords: oil deposit, salinated field, hydrodynamic modelling, experimental studies, porous medium, reaction constant, dissolution of halite.

References

1. MISHCHENKO, K.P. and A.A. RAVDEL (eds.). *Quick reference of physical-chemical quantities* [Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin]. Leningrad: Khimiya, 1974. (Russ.).
2. YEROFEYEV, B.V. Generalized equation of chemical kinetics and its application to reactions with solid substances [Obobshchennoye uravneniye khimicheskoy kinetiki i yego promeneniye k reaktsiyam s uchastiyem tverdykh veshchestv]. *Doklady AN SSSR*. 1946, vol. LII, no. 6, pp. 515–518. (Russ.).
3. *Uchenyye zapiski of Tomsk State University*. Tomsk, 1956, no. 26, pp. 103–110. (Russ.).
4. SUKHAREV, M.G., S.S. ARSENYEV-OBRAZTSOV, T.M. ZHUKOVA. *Principals of mathematical and computer simulation in oil-and-gas issues* [Osnovy matematicheskogo i kompyuternogo modelorovaniya v zadachakh neftegazovogo kompleksa]. Moscow: MAKS Press, 2010. (Russ.).
5. PIRUMOV, U.G. *Numerical methods: theory and practice* [Chislennyye metody: teoriya i praktika]. 5th ed., revised. Moscow: Yurayt, 2012. (Russ.).