

Р.А. Старостин, А.Е. Кошелев

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ РАСТВОРЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД. АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СКОРОСТИ РАСТВОРЕНИЯ КАМЕННОЙ СОЛИ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Рассмотрены различные современные методы определения коэффициента скорости растворения каменной соли в лабораторных условиях. Приведен сравнительный анализ зарубежной и отечественных методик. Рассмотрена методика, применяемая в ООО «Газ-пром геотехнологии» в испытательном лабораторном центре. Выявлены ее недостатки и достоинства, а также приведен способ модернизации методики, осуществленный в нашем лабораторном центре с помощью современного оборудования, с целью оптимизации расходов и увеличения достоверности полученных данных. Рассмотрен эксперимент по выявлению зависимости скорости растворения каменной соли от концентрации растворителя. Представлены графики данной зависимости для нескольких образцов каменной соли, а также приведен сравнительный график полученных нами результатов с результатами предыдущих исследователей. Сделан вывод об увеличении времени растворения каменной соли в лабораторных условиях, в среднем до 60 мин.

Ключевые слова: растворение, каменная соль, концентрация, динамометр, осадок, коэффициент скорости растворения, образец.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-54-62

При создании подземной выработки в массиве каменной соли геотехнологическим способом (размыв) одним из критериев оценки скорости растворения (соответственно и скорости строительства подземного хранилища газа (ПХГ)) является коэффициент скорости растворения каменной соли (k). Этот показатель каменной соли предопределяет основные технологические параметры процесса создания подземных выработок-емкостей. Коэффициент скорости растворения характеризует количество соли, растворимой с единицы поверхности

за единицу времени при концентрационном напоре, равном 1 (в лабораторных испытаниях), в условиях естественной конвекции. Коэффициент скорости растворения определяется с целью получения тенденции растворимости каменной соли по глубине ее залегания, можно приблизительно оценить участки, на которых соль будет растворяться быстрее, на каких медленнее, где загрязнена и возможно выпадение нерастворимого осадка. Строительство ПХГ ведется в несколько этапов, первым из которых является гидроруб, однако до этого бурятся

разведывательные скважины с отбором kernового материала и появляется возможность использовать полученные лабораторным путем данные для расчета скорости растворения соли на первом этапе (гидроврубе), а возможно и на последующих ступенях строительства. Получением скорости растворения каменной соли занимаются на протяжении многих лет, так как эти данные требуются не только для создания подземных хранилищ, но и при добыче соли методом подземного растворения (например, в Канаде (Саскачеван) с 1964 г. действует первое предприятие по добыче калийной соли методом подземного растворения).

Со временем методики оценки скорости растворения видоизменялись и совершенствовались. В наши дни развитие компьютерных технологий способствовало созданию современных методов анализа и диагностики (акустической эмиссии, лазерного сканирования, тензометрии и др.), которые дают возможность обработки больших массивов данных и детализации результатов испытаний, что в свою очередь диктует внесение изменений в существующие методы и способы проведения научных исследований. Поэтому актуальной задачей является адаптация или принципиальное изменение методического подхода для некоторых исследований, в том числе и для испытаний по определению скорости растворения каменной соли для производственных задач с наименьшими материальными затратами и наибольшей достоверностью.

На данный момент можно выделить следующие методы определения скорости растворения каменной соли:

- метод, применяемый немецкими соотрудниками (при добыче каменной соли);
- методика с измерением акустической эмиссии;
- методика экспериментального определения коэффициента скорости раст-

ворения каменной соли на образцах керна.

Рассмотрим каждую из них подробнее.

Первая рассматриваемая нами методика применяется в некоторых немецких лабораториях и состоит в том, что образец цилиндрической формы высотой 30 см, диаметром 10 см с внутренним отверстием диаметром 1 см вымывается в модуле путем подающегося вверх потока пресной воды, преимущественно на его вертикальные поверхности. Не растворяющиеся элементы оседают на дне сосуда, рассол уходит через верхнюю часть модуля.

Вымывание происходит при постоянной температуре воды и при одной скорости. В течение процесса вымывания уровни плотности уходящего рассола практически постоянны. Процесс растворения считается завершенным, когда образец оказывается полностью растворенным (не считая не растворяющихся частиц), и когда плотность уходящего рассола та же, что и у входящей воды. Крутизна кривой уменьшения веса солевой пробы увязывается со средними показателями поверхности растворения пробы для подсчета специфической скорости растворения соли. Сухой вес образца пробы каменной соли до вымывания и установленный после использования для определения плотности. Весь объем не растворенных частиц, осевших на дне модуля, и сухой вес твердых веществ используются для определения с достаточной точностью объемной плотности твердых веществ в рассоле (объемной плотности в углублениях каверн). Специфическая скорость растворения каменной соли может определяться относительно установленной поверхности растворения путем измерения уменьшения веса за единицу времени.

Данный способ, судя по всему, действительно дает возможность точно и многогранно охарактеризовать скорость

растворения каменной соли, однако у него есть серьезный недостаток, особенно в виду сложившейся экономической ситуации в мире, и в России в частности — это стоимость такого оборудования слишком велика. При этом еще и не до конца понятно, каким образом идет учет массы нерастворимого осадка, так как просто собрать со дна частицы не всегда представляется возможным.

Вторая рассматриваемая методика, с измерением акустической эмиссии, заключается в следующем — растворение осуществляется в стальной емкости объемом 14 л с толщиной стенок 0,5 мм, наполненной водой. В нее помещается образец так, чтобы верхний край его находился ниже уровня воды на 1–2 см. Объем воды под нижним краем образца более 10 л. Образец каменной соли подвешивается на динамометрической балке. Сама балка с наклеенными на нее тензодатчиками регистрирует изменение веса образца при растворении. В процессе эксперимента системой A-Line 32D используется четыре канала регистрации сигналов акустической эмиссии. Два преобразователя располагаются на образце: один на верхнем тор-

це, другой на нижнем, они регистрируют сигналы акустической эмиссии, прошедшие через образец каменной соли. Еще два располагаются на самой емкости. Пластинки закрывают оба торца образца полностью, защищая их от растворения.

В процессе растворения измеряется температура. Образец подвешивается на крюк динамометра, после чего производится выдержка в течение 20 с для последующего определения веса образца в воздухе. Затем образец плавно опускается в воду, при этом показания динамометра изменяются в сторону уменьшения значений. После этого в процессе растворения показания динамометра плавно уменьшаются в соответствии с уменьшением веса. После достижения образцом размеров, при которых могло бы произойти обнажение преобразователей и их контакт с водой, образец извлекается из воды путем перемещения динамометра вверх. Затем после 20 с образец снимается с крюка динамометра, после чего показания регистрируются в течение 20 с.

В данном случае скорость растворения определяется как коэффициент, характеризующий наклон прямой в урав-

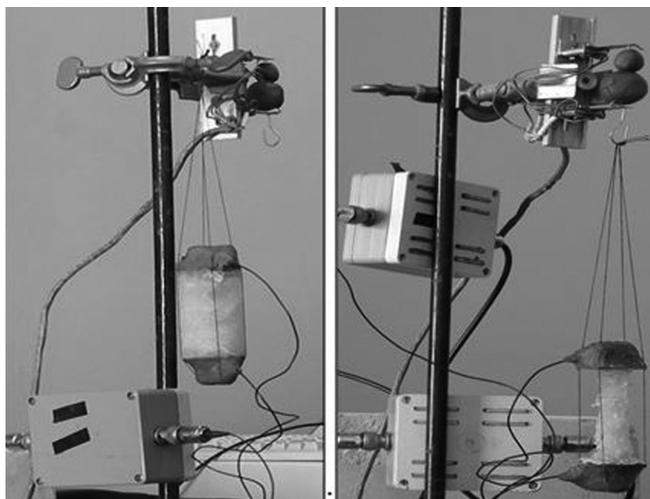


Рис. 1. Фотография образца каменной соли до и после растворения с одновременным измерением акустической эмиссии



Рис. 2. Фотография образца каменной соли, подготовленного к растворению и образца каменной соли после растворения

нении линейной регрессии по выборке достаточно большого объема (400 элементов) из отсчетов, расположенных последовательно друг да другом. В процессе вычислений это «окно» сдвигается на один элемент слева направо по времени, и таким образом рассчитываются соответствующие каждому моменту времени значения скорости убывания массы образца.

В данной методике большая часть уделена именно акустической эмиссии, однако сам способ измерения с помощью тензометрических датчиков очень интересен. Однако есть некоторые мо-

менты, которые не учитываются в данном способе, такие как выпадение нерастворимого и растворимого осадка из образца, а также время растворения ограничивается растворением поверхности каменной соли до диаметра равного или большего диаметрам датчиков АЭ.

Третья рассматриваемая методика в настоящее время используется для определения коэффициента скорости растворения каменной соли в нашей организации, рекомендована инструкцией ГРР-78, но при этом использование данной методики не регламентировано нормативным документом государственного

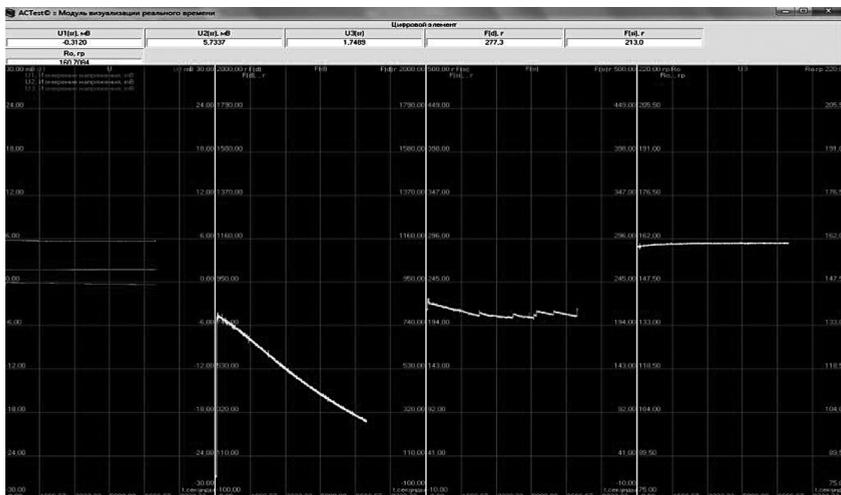


Рис. 3. Фотография экрана ПК оператора при проведении испытания по растворению каменной соли

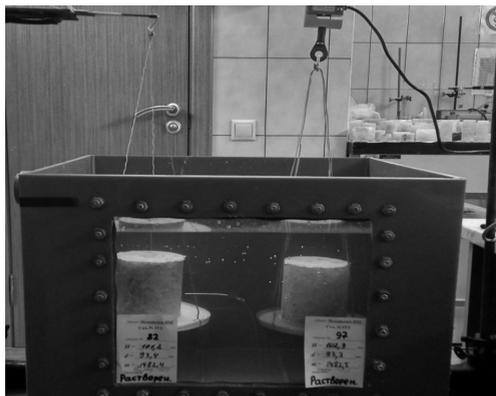


Рис. 4. Фотография внешнего вида экспериментальной установки при проведении испытания по растворению каменной соли

образца. Суть данной методики состоит в следующем: из керна изготавливается цилиндрический образец высотой 10 см с гладкой боковой поверхностью и диаметром не менее 30 мм (обычно диаметр образца равен диаметру керна, обточенному до гладкой поверхности); образец взвешивается и определяется первоначальная боковая поверхность образца (S_0); торцевые поверхности образца изолируются от контакта с водой и определяется вес образца (M_1).

Далее производится растворение образца соли в пресной воде при температуре 20° С в вертикальном положении в течение 20–25 мин. После извлечения образца из воды и удаления остатков жидкости определяется вес образца после растворения (M_2).

Вычисляется потеря массы образца Δm , г: $\Delta m = m_1 - m_2 + m_{\text{нв}}$, г.

По убыли веса определяется средняя боковая поверхность образца $S_{\text{ср}}$, см²:

$$S_{\text{ср}} = \frac{2}{3} S_0 \frac{1 - \left(1 - \frac{\Delta m}{m_0}\right)^{\frac{3}{2}}}{\frac{\Delta m}{m_0}},$$

где m_0 — масса образца до изолирования торцов и рассчитывается коэффи-

циент скорости растворения с учетом изменения плотности растворителя в процессе растворения:

$$K_p = \frac{36\Delta m}{S_{\text{ср}} t (C_H - C_0)},$$

где K_p — коэффициент скорости растворения каменной соли, (см/с); t — продолжительность растворения, с; C_H — предельная плотность рассола (для температуры 20 °С $C_H = 1,317$ г/см³), г/см³; C_0 — плотность растворителя (принимается равной 1, так как процесс растворения происходит в пресной воде), г/см³.

В существующей методике можно выделить следующие недостатки:

- в определении веса растворенной соли входит вес нерастворимых включений, выпавших из образца, что приводит к завышению реального значения;
- нет возможности наблюдать процесс растворения в динамике (следить за изменением массы);
- получаем только начальные и конечные численные значения;
- время растворения недостаточно для получения истинного максимального значения коэффициента скорости.

В испытательном лабораторном центре (ИЛЦ) модернизирована и усовершенствована данная методика, суть ее не меняется, однако, за счет применения нескольких динамометров с высокой точностью, а также программно-измерительного комплекса AC Test в нее вносятся следующие новшества:

- автоматизация контроля потери массы образца (с учетом погружения его в воду);
- графическое отображение всего процесса растворения в динамике;
- получение данных о нерастворимом и растворимом осадках, выпадающих из испытываемого образца на сито с минимальным размером ячеек, также подвешенное на динамометр (получаем

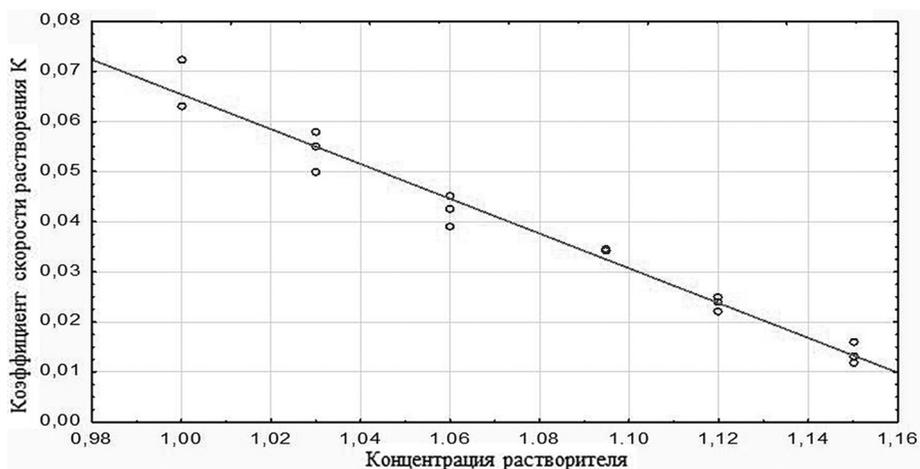


Рис. 5. График зависимости коэффициента скорости растворения от концентрации растворителя по полученным экспериментальным данным на интервале 20 мин и по данным В.А. Мазурова на интервале 20 мин

уточненную массу, и при этом имеем возможность наблюдать, что некоторые выпавшие частицы соли продолжают растворяться и далее, а у некоторых процесс растворения замедляется или прекращается вовсе из-за скопления в нижней части сита рассола с большей плотно-

стью, что наиболее характерно для образцов, растворяемых в уже насыщенном соляном растворе).

Были проведены испытания образцов каменной соли, по усовершенствованной методике, со схожим химическим и минеральным составом, изготовленные

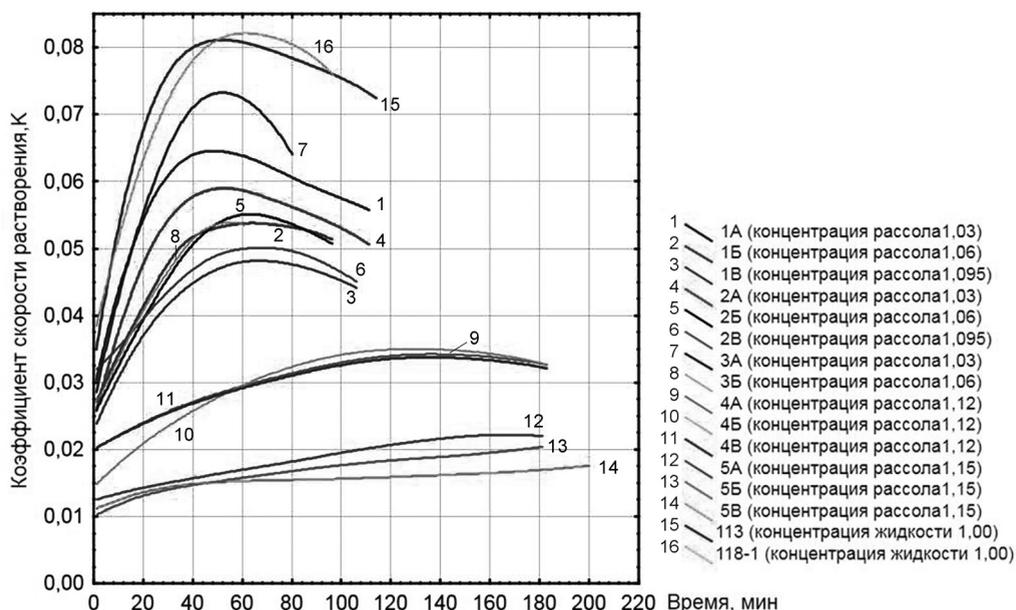


Рис. 6. График зависимости коэффициента скорости растворения от различных концентраций жидкости/рассола во времени

из кернавого материала Калининградского ПХГ, с целью изучения влияния концентрации растворителя на скорость растворения.

Растворение проводилось при различных плотностях растворителя:

- вода ($\rho = 1,00 \text{ г/см}^3$);
- рассол ($\rho = 1,03 \text{ г/см}^3$);
- рассол ($\rho = 1,06 \text{ г/см}^3$);
- рассол ($\rho = 1,095 \text{ г/см}^3$);
- рассол ($\rho = 1,12 \text{ г/см}^3$);
- рассол ($\rho = 1,15 \text{ г/см}^3$).

При каждой концентрации растворялось по три образца каменной соли. Были получены численные значения коэффициента скорости растворения для каждого образца, а также графики, наглядно иллюстрирующие весь процесс. В результате испытаний была установлена зависимость скорости растворения от концентрации растворителя. Затем был проведен сравнительный анализ между полученными нами данными и значениями, указанными в работе В.А. Мазурова, которые подтвердили правоту исследований (графики зависимостей скорости растворения от концентрации растворителя практически накладываются друг на друга и имеют линейную зависимость) представлены на рис. 5.

Действительно при прочих равных условиях (температура, размеры образца, его химический состав, объем растворителя и т.д.) чем выше плотность рассола, тем ниже скорость растворения. Так, например, скорость растворения в чистой воде с плотностью $1,00 \text{ г/см}^3$ в 4 раза выше скорости растворения в рассоле с плотностью $1,15 \text{ г/см}^3$ за интервал времени в 20 мин. Однако, при времени растворения равном 60 мин скорости

отличаются уже приблизительно в 5 раз. Речь идет о 60 мин, так как именно в период от 40 до 90 мин проявляется пик растворения, что можно увидеть на представленном графике (рис. 6).

Исходя из этих соображений был сделан вывод о том, что время растворения в методике необходимо увеличить до 60–90 мин для каждого образца. Благодаря усовершенствованию методики были достигнуты следующие результаты:

1. появилась возможность анализировать полученные графики растворения каменной соли (например, в программе Statistica мы можем выбрать интересующий нас интервал времени или интервал, при котором замедляется процесс растворения и т.д.);

2. получено экспериментальное подтверждение того, что необходимо изменить в самой существующей методике пункт, касающийся длительности проведения эксперимента — его время должно составлять не 20–25 мин, а 40–90 мин, так как именно в данном временном интервале наблюдается пик активности при растворении каменной соли;

3. получена возможность проведения более точных экспериментов с целью выявления зависимости скорости растворения каменной соли от концентрации растворителя (воды и рассола).

В дальнейшем на базе нашего предприятия Испытательным лабораторным центром планируется разработка Стандарта Организации (СТО) по экспериментальному растворению каменной соли, а также возникает вопрос об использовании в дальнейших расчетах коэффициента скорости растворения или же осуществлять их по массе каменной соли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика экспериментального определения коэффициента скорости растворения каменной соли на образцах керна. — М.: ООО «Подземгазпром», 1995.
2. Смирнов В.И. Строительство подземных газонефтехранилищ. — М.: Газойл пресс, 2000. — 250 с.

3. Бочкарева Р.В., Сохранский В.Б., Шустров В.П. Лабораторные исследования керна разведочных скважин для проектирования хранилищ жидкостей и газов в каменной соли // Наука и техника в газовой промышленности. — 2002. — № 4.

4. Куле П.А. Разработка месторождений соли подземным выщелачиванием / Труды ВНИИГ, вып. 20. —Л., 1949.

5. Эртуганова Э.А. Разработка акустоэмиссионного способа контроля разрушения соляных горных пород при их растворении. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — М., 2007.

6. Способ и приспособление для добычи соли мокрым способом на наклонных соляных месторождениях. Verfahren und Vorrichtung zur Aussolung geneigter Lagerstätten: Заявка 19831234 Германия, МПК(Е 21 С 41/20. Kavernen Bau- und Betriebs-Ges. rribH; deusa Projektmanagement GmbH, Gruschow N., Walkhoff. F.K.H \ . 19H:И2:Ц.2\ Заявл. 11.07.1998; Опубл. 13.01.2000.

7. Пермьяков Р.С., Романов В.С., Бельды М.П. Технология добычи соли. — М.: Недра, 1981.

8. Долгих М.Д., Матвиенко В.В., Хачатурян И.С. Оценка прочности камер выщелачивания в отложениях каменной соли. Вып. 2. — М.: ВНИИСТ, 1962.

9. Косаревский А.Н., Резников В.А., Студенцов А.Ф., Школьников Д.Д. О моделировании процесса подземного растворения / Труды ВНИИГ. Вопросы технологии рассолодобычи через скважины с поверхности. — Л. 1990.

10. Holst K., Menzel W., Schreiner W., Weber D. Ergebnisse geomechanischer Untersuchungen bei der Gasspeicherung in Salzkavernen // Neue Bergbautechnik. 1982. Н. 7.

11. Petts E.L.S., Thomson T.W., Possaris E.K.S., Horseman S.T. Investigation into Underground Gas Storage in Brine Well Cavities. 5th Symp. Salt Vol. 2. Cleveland, Ohio, 1980.

12. Rohr H.V. Gebirgmechanisches Verhalten einer Kaverne in Salzgestein. Kali und Steinsalz, 1973, Bd. 6. **ГИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Старостин Руслан Андреевич¹ — младший научный сотрудник,
e-mail: r.starostin@gazpromgeotech.ru,

Кошелев Александр Евгеньевич¹ — кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: a.e.koshelev@yandex.ru,

¹ ООО «Газпром геотехнологии».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 4, pp. 54–62.

R.A. Starostin, A.E. Koshelev

MODERN METHODS TO DETERMINE ROCK DISSOLUTION VELOCITY. AUTOMATION OF ROCK SALT DISSOLUTION VELOCITY COEFFICIENT PROCEDURE FOR LABORATORY TESTS

In focus are the modern methods available to determine the coefficient of rock salt dissolution in lab-scale conditions. The foreign and domestic procedures are compared. The practice of the test operation center of Gazprom Technology company is analyzed in more detail. The shortcomings and benefits of the practice are specified, and the approach to the technology modernization using the modern equipment in order to optimize expenditures and to improve reliability of data is presented. The experimental determination of the dependence of rock salt dissolution velocity on solvent concentration is described. The plots of the revealed dependence are presented for a number of rock salt specimens together with the comparative diagram of the current and previous test results. The final conclusion is drawn on the expansion of time of rock salt dissolution in laboratory conditions to 60 minutes at the average.

Key words: dissolution, rock salt, concentration, dynamometer, settlings, dissolution velocity coefficient, specimen.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-54-62

AUTHORS

Starostin R.A.¹, Junior Researcher,
e-mail: r.starostin@gazpromgeotech.ru,
Koshelev A.E.¹, Candidate of Technical Sciences,
Leading Researcher,
e-mail: a.e.koshelev@yandex.ru,
¹ LLC «Gazprom Geotechnology»,
123290, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. *Metodika eksperimental'nogo opredeleniya koeffitsienta skorosti rastvoreniya kamennoy soli na obratzakh kerna* (Procedure of experimental determination of rock salt dissolution velocity coefficient on core specimens), Moscow, OOO «Podzemgazprom», 1995.
2. Smirnov V.I. *Stroitel'stvo podzemnykh gazoneftekhranilishch* (Construction of underground oil and gas storages), Moscow, Gazoyl press, 2000, 250 p.
3. Bochkareva R.V., Sokhranskiy V.B., Shustrov V.P. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*. 2002, no 4.
4. Kulle P.A. *Razrabotka mestorozhdeniy soli podzemnym vyshchelachivaniem*. *Trudy VNIIG*, issue 20, Leningrad, 1949.
5. Ertuganova E.A. *Razrabotka akustoemissionnogo sposoba kontrolya razrusheniya solyanykh gornykh porod pri ikh rastvorenii* (Development of acoustic emission control of salt rock destruction under dissolution), Candidate's thesis, Moscow, 2007.
6. *Verfahren und Vorrichtung zur Aussolung geneigter Lagerstätten: Application 19831234* Germany, MPK (E 21 C 41/20. Kavernen Bau- und Betriebs-Ges. rribH; deusa Projektmanagement GmbH, Gruschow N., Walkhoff F.K.H., 13.01.2000.
7. Permyakov R.C., Romanov B.C., Bel'dy M.P. *Tekhnologiya dobychi soli* (Technology of salt production), Moscow, Nedra, 1981.
8. Dolgikh M.D., Matvienko V.V., Khachatryan I.S. *Otsenka prochnosti kamer vyshchelachivaniya v otlozheniyakh kamennoy soli*. Vyp. 2 (Assessing the safety cameras leaching in salt, issue 2), Moscow, VNIIST, 1962.
9. Kosarevskiy A.N., Reznikov V.A., Studentsov A.F., Shkol'nikov D.D. *O modelirovanii protsessa podzemnogo rastvoreniya*. *Trudy VNIIG. Voprosy tekhnologii rassolodobychi cherez skvazhiny s poverkhnosti*, 1990.
10. Holst K., Menzel W., Schreiner W., Weber D. *Ergebnisse geomechanischer Untersuchungen bei der Gasspeicherung in Salzkavernen*. *Neue Bergbautechnik*. 1982. H. 7.
11. Petts E.L.S., Thomson T.W., Possaris E.K.S., Horseman S.T. *Investigation into Underground Gas Storage in Brine Well Cavities*. 5th Symp. Salt Vol. 2. Cleveland, Ohio, 1980.
12. Rohr H.V. *Gebirgmechanisches Verhalten einer Kaverne in Salzgestein*. Kali und Steinsalz, 1973, Bd. 6.

FIGURES

Fig. 1. Photo of rock salt specimen before and after dissolution and simultaneous measurement of acoustic emission.

Fig. 2. Photo of rock salt specimen prepared for dissolution and rock salt specimen after dissolution.

Fig. 3. Photo of operator's display during rock salt dissolution tests.

Fig. 4. Photo of experimental plant for rock salt dissolution testing.

Fig. 5. Plot of dissolution velocity coefficient and solvent concentration based on the experimental results and by Mazurov's data in the interval of 20 min.

Fig. 6. Time dependence of dissolution velocity coefficient and liquid/saline solution concentration.

