

**Агеенко В.А.**

к.т.н., главный специалист
испытательного лабораторного
центра инженерно-технического
центра ООО «Газпром геотехнологии».
valera.ageenko@mail.ru

**Кравченко О.С.**

к.т.н., главный специалист отдела
геологии ООО «Газпром геотехнологии»
o.kravchenko.msu@inbox.ru

**Старостин Р.А.**

ведущий специалист испытательного
лабораторного центра инженерно-
технического центра
ООО «Газпром геотехнологии»
r.starostin@inbox.ru

МЕЛКОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ КАМЕННОЙ СОЛИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПХГ

В работе рассмотрены особенности стратификации рассола по высоте при растворении образца каменной соли в лабораторных условиях. Продемонстрирована особенность растворения образцов каменной соли. Получены данные о том, как изменяется концентрация рассола в процессе эксперимента. А также сделаны выводы о том, что необходимо учитывать данные особенности растворения при разработке организационно-технических мероприятий по мониторингу за состоянием подземных хранилищ газа в каменной соли в процессе их строительства.

Ключевые слова: Каменная соль, моделирование технологии, лабораторный эксперимент, стратификация рассола, концентрация рассола, подземные хранилища газа.

Метод подземного растворения через индивидуальные скважины используется в горной практике при разработке пластов каменной соли с целью добычи полезного ископаемого и с целью строительства подземных камер-хранилищ. Строительство подземных хранилищ предусматривает получение устойчивой выработки с целью дальнейшей эксплуатации.

Процесс растворения каменной соли при строительстве подземных резервуаров геотехнологическим методом через буровые скважины относится к внутренней задаче массообмена. Этот процесс описывается уравнениями движения, энергии, диффузии, неразрывности. Для полного решения задачи процесса подземного

растворения соли необходимо воспользоваться численными методами расчёта, применение которых не всегда является простым. Поэтому, в настоящее время расчёт параметров процесса подземного растворения соли осуществляется с применением критериальных уравнений. Эмпирические коэффициенты, входящие в критериальные уравнения, определяются экспериментально на основании моделирования технологии строительства подземного хранилища. [1].

В процессе подземного растворения каменной соли под действием сил гравитации происходит стратификация рассола по высоте выработки, которая приводит к преимущественному развитию её верхней части. С другой стороны,

при нарушении естественного напряженно-деформированного состояния массива каменной соли, вследствие создания выработки-ёмкости, для сохранения устойчивости требуется преимущественное развитие её нижней части. Следовательно, главной задачей формирования подземных выработок-ёмкостей является оптимальное преодоление противоречия между процессом развития верхней части выработки и требованием сохранения устойчивости под действием горного давления[2].

Наиболее значимые результаты по растворению каменной соли были отражены в работе Мазурова В.А. [3].

Работа Каратыгина Е.П. посвящена изучению теории поведения каменной соли при её растворении. [4].

Закономерности формообразования подземной камеры при подземном растворении пластов каменной соли описаны в работах [5].

Поведение каменной соли в процессе растворения при строительства подземных резервуаров в работе Малюкова В.П. [6].

В настоящей работе показывается поведение каменной соли при ее растворении на мелкомасштабной модели в лабораторных условиях.

Методика проведения эксперимента

Для моделирования процесса растворения была изготовлена установка, которая позволяла контролировать расход рассола, соответствовала заданным размерам и необходимым входным параметрам. Трёхмерная модель установки представлена на *рисунке 1*.

Ёмкость 1, в которую погружались образцы каменной соли, имела внутренние размеры 160x60x250 мм. Для проведения эксперимента было изготовлено два образца каменной соли. Перед проведением эксперимента образцы были загерметизированы по 5 граням. После они были установлены в ёмкость 1 так, чтобы открытые грани были расположены со стороны подачи воды. После ёмкость была заполнена рассолом NaCl с плотностью 1,197 г/мл и концентрацией 311,2 г/л. Подача воды производилась по трубке 5 из бочки 4. Трубка подачи воды была расположена в центре ёмкости на равноудалённом расстоянии от образцов каменной соли. Расстояние между дном ёмкости и трубкой подачи воды составляло 1 см. Скорость подачи регулировалась расходомером 6. В процессе эксперимента было израсходовано 2,5 литра воды. Для визуализации эксперимента вода подкрашивалась, что позволяло наблюдать ее распределение по рассолу. Отбор рассола, необходимого для измерения его концентрации, производился по трубке 7 из трёх точек, которые располагались вертикально

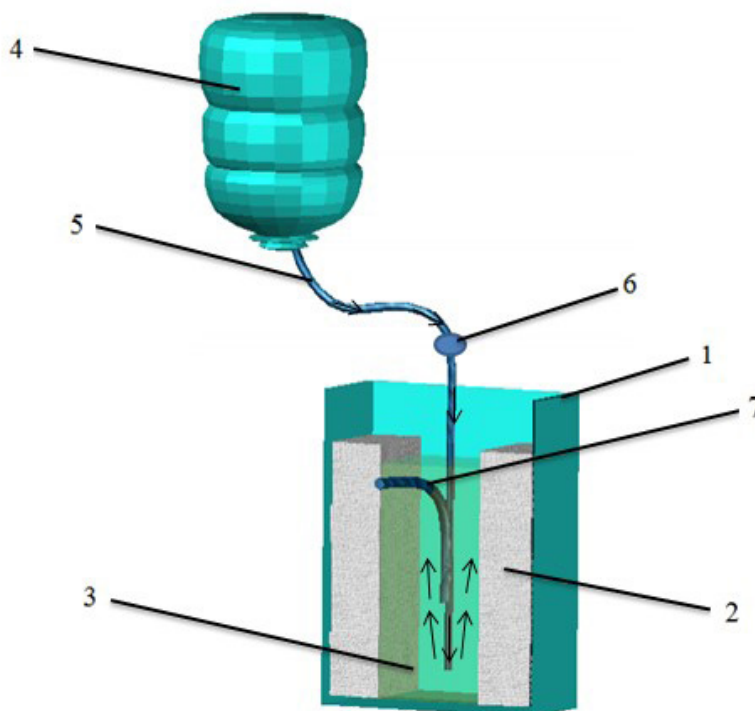


Рис. 1.
Установка по растворению образцов каменной соли.
1- ёмкость для растворения, 2- образцы каменной соли, 3- рассол, 4- ёмкость с водой, 5- трубка подачи воды, 6 - кран регулирования расхода воды, 7- трубка откачки рассола.

Таблица 1.
Характеристики образцов.

| | I образец | II образец |
|-----------------------------|-----------|------------|
| Высота, мм | 199,5 | 195,7 |
| Ширина, мм | 59,4 | 59,2 |
| Толщина, мм | 62,5 | 58,0 |
| Масса, гр | 1504,5 | 1383,0 |
| Плотность г/см ³ | 2,03 | 2,06 |

Таблица 2.
Значение концентрации рассола с разбавлением.

| Время, мин | Концентрация | | |
|------------|------------------|------------------|-------------------|
| | 2 см от дна, г/л | 9 см от дна, г/л | 11 см от дна, г/л |
| 0 | 9,26 | 9,26 | 9,26 |
| 30 | 8,13 | 8,02 | 6,52 |
| 60 | 8,02 | 7,82 | 5,97 |
| 90 | 7,83 | 7,8 | 6,42 |
| 150 | 8,2 | 7,96 | 6,7 |
| 210 | 8,54 | 7,88 | 6,62 |
| 290 | 8,86 | 8,12 | 6,63 |

Таблица 3.
Значение концентрации рассола без разбавления.

| Время, мин | Концентрация | | |
|------------|------------------|------------------|-------------------|
| | 2 см от дна, г/л | 9 см от дна, г/л | 11 см от дна, г/л |
| 0 | 83,5 | 83,5 | 83,5 |
| 30 | 82,1 | 79,9 | 72,6 |
| 60 | 81,8 | 77,2 | 70,8 |
| 90 | 81,3 | 76,7 | 68,4 |
| 150 | 81,5 | 78,7 | 74,7 |
| 210 | 82,6 | 79,1 | 77,3 |
| 290 | 82,5 | 78,2 | 74,1 |

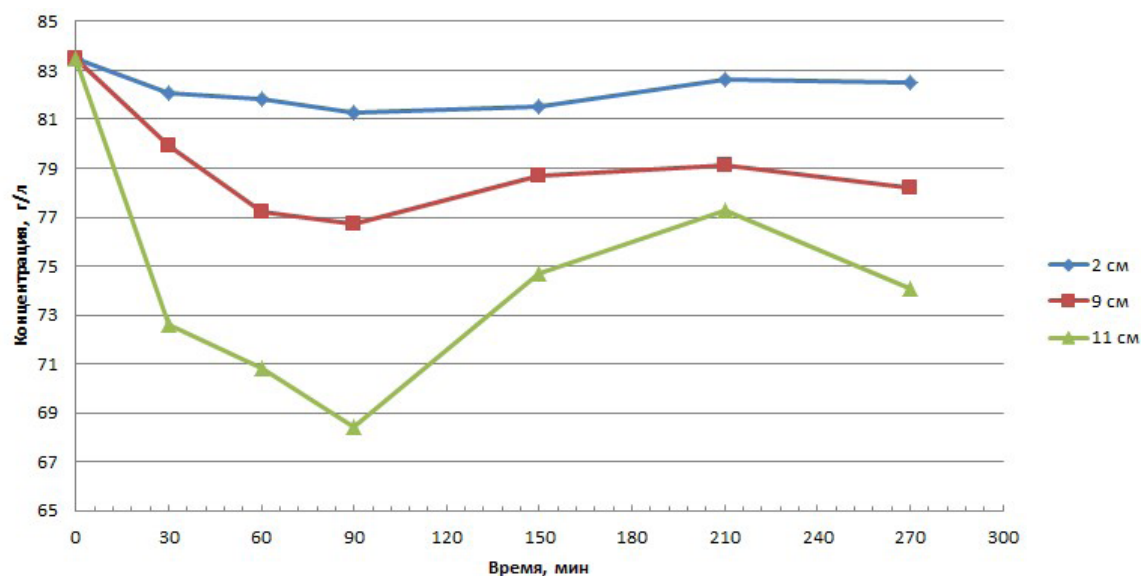


Рис. 2.
Изменение концентрации отобранного рассола в зависимости от глубины отбора с течением времени.

на расстоянии 2 см, 9 см и 11 см от дна ёмкости. Изменение концентрации во времени производилось специализированным прибором с разбавлением рассола пресной водой (10 мл рассола и 250 мл воды) и без разбавления. Длительность эксперимента 4 часа 50 минут.

Результаты и их обсуждение.

Объектом исследования являются образцы каменной соли, отобранные из Калининградской площади. Для проведения эксперимента были подобраны близкие образцы по структуре. [7].

Данные по образцам представлены в **таблице 1**.

Значение концентрации рассола в различные промежутки времени (с разбавлением водой) представлено в **таблице 2**.

Значение концентрации рассола по прибору в различные промежутки времени (без разбавления водой) представлено в **таблице 3**.

По результатам эксперимента был построен график изменения концентрации отобранного рассола в зависимости от глубины отбора с течением времени.

На графике видно, что во все трех точках отбора концентрация рассола в одно и то же время разная: чем выше точка отбора от дна, тем ниже концентрация рассола. Также анализируя полученный график, можно сказать, что во всех трех точках с начала эксперимента наблюдается резкое уменьшение значений концентрации рассола. С течением времени, в процессе размыва каменной соли, концентрация рассола в точках отбора начинала расти. Данное явление начинает прослеживаться после 90 минут проведения эксперимента.

Выводы

Полученные в работе данные свидетельствуют о стратификации рассола по высоте растворяемого образца. Это свидетельствует о том, что в первую очередь растворяется верхняя часть образца, а нижняя менее подвержена растворению. Полученные результаты необходимо учитывать в проектировании и при разработке организационно-технических мероприятий по мониторингу за состоянием резервуара в процессе его строительства. ❶

Литература

1. Мазуров В.А. Подземные газохранилища в отложениях каменной соли - М.: Недра. - 1982. - 212 с.
2. Казарян В.А. Подземное хранения газов и жидкостей. - Москва: Институт компьютерных исследований. - 2006. - 428 с.
3. Мазуров В.А. Научные основы сооружения в отложениях каменной соли подземных емкостей для хранения нефте- и газопродуктов. - дис. на соискания ученой степени доктора наук. - Москва: ВНИИПромгаз. - 1971. - 419 с.
4. Каратыгин Е.П., Кубланов А.В., Пустыльников Л.М., Чанцев В.П. Подземной растворение соляных залежей. - С. Петербург: Гидрометеоздат. - 1994. - 222 с.
5. Смайль Н.Ю. Закономерности формообразования подземной камеры при подземном растворения пластов каменной соли. - доклад на симпозиуме «Неделя горняка-2001». - Москва: МГГУ. - 2001 г. - 4 с.
6. Малюков В.П. Крупномасштабное моделирование строительства горизонтальных резервуаров в каменной соли при подземном растворении. - Москва: ГИАБ. - Семинар № 15. - 2005г.-208 с.
7. Малюков В.П., Шепилов А.А. Технологии создания выработок-емкостей при подземном растворении каменной соли. - Процессы в геосредах. - № 4. - 2020 г. - 936 с.

UDC 622.03

V.A. Ageenko, Candidate of Technical Sciences, specialist of the Testing Laboratory Center of the Engineering and Technical Center of Gazprom Geotechnology LLC, valera.ageenko@mail.ru

O.S. Kravchenko, Candidate of Technical Sciences, specialist of the Geology Department of Gazprom Geotechnology LLC, o.kravchenko.msu@inbox.ru

R.A. Starostin, Leading specialist of the testing laboratory center of the Engineering and Technical Center of Gazprom Geotechnology LLC, r.starostin@inbox.ru

SMALL-SCALE MODELING OF THE PROCESS OF DISSOLUTION OF ROCK SALT DURING THE CONSTRUCTION OF UGS

Abstract: The paper considers the features of brine stratification by height when dissolving a sample of rock salt in laboratory conditions. The peculiarity of the dissolution of rock salt samples is demonstrated. Data on how the brine concentration changes during the experiment were obtained. It is also concluded that it is necessary to take into account these features of dissolution when developing organizational and technical measures to monitor the condition of underground gas storage facilities in rock salt during their construction.

Keywords: Rock salt, technology modeling, laboratory experiment, brine stratification, brine concentration, underground gas storage.