**Экологическая надежность техногенных подземных каверн**

Б.К. Лапочкин, кандидат геолого-минералогических наук (Институт геоэкологии РАН), Л.К. Сильвестров, кандидат технических наук

Более чем 50-летний опыт использования техногенных каверн в каменных солях в качестве хранилищ углеводородных жидкостей и газов позволил выявить ряд проблем, важнейшей из которых являются утечки хранимых продуктов в соляной массив. Утечки могут возникать при складировании опасных, в том числе радиоактивных промышленных отходов, что может привести к региональному химическому или радиоактивному загрязнению территории с тяжелыми долговременными последствиями.

1 Труды осенней конференции SMRJ 2001 г. Т. 1. (Американского института разработки месторождений полезных ископаемых методом подземного растворения через скважины 2000-2001 гг.).

Утечки в соляных массивах стали предметом пристального внимания специалистов уже с середины 1980-х годов, когда начали подвергаться сомнению утверждения об абсолютной непроницаемости каменной соли для газов и жидкостей. Сомнения были обусловлены появлением и накоплением новых результатов экспериментальных исследований, как за рубежом, так и в России. Результаты этих исследований нашли свое отражение в весьма представительном количестве публикаций (Ауфрихт X., 1981; Крическу Н., 1994; Хансче У., 1998; Линн Дж.К., 1999; Воллнер М., 2000; Вернер М., 2000., Паар У.А., 2000 и др.). Научному обсуждению вопроса обеспечения герметичности подземных каверн, проницаемости каменных солей, сооружения, герметизации и эксплуатации искусственных каверн был посвящен симпозиум по герметизации и закрытию («ликвидации») каверн в отложениях каменной соли1.

Утечки (потери) хранимых веществ могут быть обусловлены тремя основными факторами:

проницаемостью соляного массива, вмещающего техногенную каверну;

гидроразрывами (макро- и микрорастрескивания) соли, в связи с повышением давления жидкости;

негерметичностью обсадной колонны на контакте с горными породами, пройденными (пересеченными) скважиной в процессе бурения.

Широкомасштабные исследования физико-механических и фильтрационных свойств солей, проведенные в течение последних лет в натурных и лабораторных условиях в промышленно развитых странах Европы и в США позволили получить репрезентативные данные об этих свойствах соли в естественном залегании (in sity).

Эти новые данные показали, что каменная соль не представляет собой сплошной изотропный непроницаемый для жидкостей и газов упруго пластичный материал, способный полностью самозалечивать микро- и макротрещины под действием внешнего давления. Согласно новым представлениям, каменная соль в естественном залегании « это ансамбль структурно неоднородных элементов, то есть сложный, неоднородный, поликристаллический, слабопроницаемый материал, обладающий выраженными пластическими свойствами. Весьма низкая проницаемость каменной соли (порядка 10-21-10-22 м2) при определенных нагрузках и (или) термодинамических условиях может возрастать в тысячи и более раз без возникновения макротрещин гидроразрыва, видимых признаков разрушения структуры и потери сплошности.

Исследования показали, что на величину и характер проницаемости каменной соли могут оказывать такие факторы как:

генезис и морфология конкретного участка соленосных отложений (пластовая залежь, предгорный прогиб, купольная структура);

пористость и ее тип (открытая, закрытая, смешанная, трещинная, гранулярная, сосредоточенная, рассеянная и др.);

содержание в соли нерастворимых включений в виде межсолевых прослоев и пропластков, различного минерального состава (гипсы, ангидриды, глины, терригенные, карбонатные образования и др.);

наличие исходной скрытой «залеченной» трещиноватости и присутствие в системе микро- и макротрещин, посторонних материалов, способных к адсорбции или адгезии на поверхности соли;

термодинамические условия фильтрации и особенно их динамика по направлению движения потока (температура, давление, влажность);

тип фильтрующегося через соль флюида (газ, водные растворы солей, углеводородные или органические жидкости).

Для конечных оценок проницаемости конкретного соляного массива требуется точное знание различных сочетаний перечисленных факторов, что позволит при необходимости управлять ими, изменяя в желательном направлении. Это позволит также определить тот оптимальный минимум исходной информации о свойствах соли, который необходим при проведении геологоразведочных (оценочных) работ как важнейшего этапа при проектировании подземного хранилища в каменной соли.

Эффект гидроразрыва (растрескивания) соли может быть вызван превышением допустимого давления жидкости в каверне, и потому, во избежание ее растрескивания, требуется ограничение предельного давления, создаваемого внутри каверны. Как показали результаты исследований, ограничением давления возможно управление темпом развития разрыва (растрескивания). В целом темпы развития трещин разрыва, измеренные в натурных экспериментах на скважинах, обычно выше ожидавшихся при естественном повышении давлений в кавернах даже с учетом значительного вклада теплового расширения жидкости.

Однако в кавернах с достаточно большим вертикальным размером и с жидкостью, плотность которой значительно ниже плотности массива, соль может быть гидравлически разорвана, то есть подвержена растрескиванию. Следует указать, что большинство проведенных до сих пор исследований не указывает на то, какие условия должны быть созданы для проявления этого механизма.

Герметичность обсадной колонны в контакте с горными породами обычно обеспечивается простой операцией «пакеровки», или установки, в затрубье обсадной колонны скважины цементного моста («перемычки») твердеющим раствором специального тампонажного цемента.

Применяются также другие системы герметизации (закупорки) затрубья, рассчитанные на очень длительное время (сотни или даже тысячи лет). Эти системы включают применение природных неразрушающихся с течением времени материалов. К ним относятся бентониты, соли и т.п.

Качественный тампонаж обеспечивает плотность контакта зацементированной обсадной колонны и цементного кольца с вмещающим массивом горных пород. При этом достигается отсутствие движения жидкости как вдоль цементного кольца, так и во вмещающие, то есть прилегающие к стволу пробуренной скважины горные породы.

Особое внимание сосредотачивается на участках ствола скважины, пройденной по соли. Это самый «чувствительный» участок, где наиболее велика опасность утечек ввиду соприкосновения в нем различных материалов: каменной соли, цементного камня и стали при наличии одинакового уровня механических напряжений.

Утечки через контакт цементного моста с солью под высоким давлением жидкости в каверне возможны в течение многих лет. В подтверждение этого предположения было выполнено несколько серий исследований, в которых контакты соль « цементное кольцо обычно принимались отрывающимися при высоких напряжениях, то есть без учета геологических свойств соли.

Подводя предварительный итог изложенному можно высказать следующие суждения:

Каменная соль не является, как ранее представлялось большинству практиков, сплошной, изотропной, непроницаемой для жидкостей и газов упруго-пластичной средой, способной полностью самозалечивать микро- и макротрещины, образовавшиеся в ней по различным причинам. Она « чрезвычайно сложный материал, и потому необходимо грамотное, разумное, основанное на точном знании ее свойств, использование в качестве среды для строительства техногенных каверн.

Натурные исследования не подтверждают неизбежности гидроразрыва соли.

Пока не получено экспериментальных данных, бесспорно подтверждающих или опровергающих любой из трех названных выше потенциальных механизмов утечек при всех природных и природно-техногенных условиях.

Механизмы утечек из каверн могут изменяться в зависимости от состава, структуры и свойств соли и динамики повышения давления в каверне.

При этом важно понимать, что обеспечить абсолютную герметичность каверн и добиться полного отсутствия утечек хотя бы некоторых хранимых в таких кавернахрезервуарах продуктов (или отходов) невозможно. Однако возможно и необходимо обеспечить в каждом конкретном случае обоснованный приемлемый (оптимальный) уровень потерь и создать режим эксплуатации, при котором он не будет превышен, в первую очередь за счет ограничения максимального давления при эксплуатации.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Нормативные величины допустимых утечек (потерь) хранимого продукта из подземных резервуаров в каменной соли при максимальном рабочем давлении | | | | | | | |
| Вид флюида | Единица измерения | Расчетный период времени | | | | Относительные потери из резервуара объемом 50 м3 | |
| 1 сут. | 1 год | Срок службы | |
| 50 лет | 100 лет | за 1 год | за 50 лет |
| Нефтепродукт | м3  т | 0.02  0.017 | 7.3  623.0 | 365  311.5 | 730  6.23 | 0.0146 | 0.73 |
| Рассол | м3  т | 0.02  0.024 | 7.3  8.46 | 365  423.0 | 730  846.0 | 0.0146 | 0.73 |
| Природный газ | тыс.м3  т | 0.069  0.05 | 25.2  18.85 | 1260  942 | 2520  1885 | 1.26 | 2.52 |
| Примечание: 1 paсчетный год принят равным 365.25 сут. | | | | | | | |

Доказательствами факта официального признания проницаемости вмещающего массива каменной соли в России являются действовавшие нормативные документы по подземным хранилищам. Эти документы регламентируют допустимые уровни потерь хранимого продукта из подземных резервуаров (техногенных каверн) в каменных солях (см. таблицу).

Приведенные в таблице значения величин потерь хранимых флюидов рассчитаны на основании результатов, полученных при совместных испытаниях на герметичность технологических скважин и подземных резервуаров, причем весьма показательно, что допуски в обоих случаях одинаковы.

Следует отметить, что в одном нормативном документе возможность потерь продукта из подземных техногенных резервуаров в каменных солях не указывалась вообще, то есть официально не признавалась. Однако в нем были установлены нормы допустимого падения давления при испытаниях на герметичность технологических скважин. Позднее нормы потерь были регламентированы, но указывались только для углеводородных жидкостей, причем для скважин связывались с глубиной (0.04 м3/сут. для глубины 300 м и 0.1 м3/сут. для 1500 м).

Данные, приведенные в таблице, определены с учетом зарубежного и отечественного опыта эксплуатации подземных хранилищ в каменных солях и по порядку величин хорошо коррелируют с последними рекомендациями зарубежных специалистов. При этом предполагается технически исправное устьевое оборудование технологической скважины, герметичность обсадных колонн и высококачественный цементаж затрубного пространства. (Проницаемость цементного камня должна быть на уровне 10-18- 10-16 м2). Кроме того, предполагается, что прилегающая к подземному резервуару область вмещающих солей не содержит макротрещин, способных обусловить утечки флюида до заведомо неприемлемых величин.

При видимой значительности приведенных величин утечек флюидов, особенно за срок эксплуатации подземного резервуара в каменной соли (50 лет), относительные величины их к объему хранимого продукта невелики. Они несравненно ниже утечек из наземных резервуарных парков (нефтебаз) равной вместимости.

2 Kpoмe них при первом заполнении хранимой жидкостью существует и менее значительные (так называемые разовые) потери хранимого продукта на смачивание внутренней поверхности, адсорбцию в трещинах и порах и пр.

Основываясь на том, что систематические нормированные допустимые утечки2 одинаковы и для технологической скважины, и для резервуара и не зависят от глубины заложения и объема последнего, можно сделать вывод о том, что потери флюида происходят не по всей поверхности техногеннои каверны, а в основном в локальной зоне подбашмачного пространства обсадной колонны; утечка происходит «потоком» в виде равномерно распределенной фильтрации от подбашмачного пространства в вышележащий массив и далее к кровле ненарушенной соли.

Потери из техногенных каверн, сооружаемых геотехнологическим способом в соленосных формациях, могут вызвать негативные экологические последствия лишь в том случае, если хранимая жидкость за время эксплуатации выходит выше кровли соленосной толщи. К таким последствиям относятся загрязнение подземных водоносных горизонтов, в том числе питьевых, загрязнение поверхностных акваторий, пожары и взрывы горючих газов, углеводородных жидкостей и их паров.