

Обоснование радиационной безопасности длительного хранения газового конденсата в подземных резервуарах, образованных с применением ядерно-взрывной технологии

И.К. Романович¹, С.Л. Спешилов², М.К. Теплов²

¹ ФГУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург

² ООО «Подземгазпром», Москва

В статье изложены подходы по обоснованию безопасности длительного хранения газового конденсата и рассола в подземных резервуарах, образованных с применением ядерно-взрывных технологий. Газовый конденсат и рассол являются жидкими радиоактивными отходами среднего уровня активности, содержащими изотопы ^3H , ^{137}Cs и ^{90}Sr ; в следовых – ^{239}Pu , ^{235}U , ^{241}Am . Безопасность длительного хранения газового конденсата и рассола в подземных резервуарах рассмотрена на основе реализации принципа многобарьерности, используемого при захоронении радиоактивных отходов. Показано, что длительное хранение газового конденсата и радиоактивного рассола в законсервированных подземных резервуарах, образованных с применением ядерно-взрывных технологий в соляных куполах, не приведёт к радиоактивному загрязнению поверхности и облучению населения.

Ключевые слова: мирные ядерные взрывы, газовый конденсат, радиоактивный рассол, соляной купол, ядерно-взрывные технологии, техногенные радионуклиды, облучение населения, диффузионный массоперенос радиоактивных изотопов, водоносные горизонты.

В бывшем СССР «мирные» ядерные взрывы проводились в 1965–1988 г. Всего было осуществлено 124 взрыва. На территории Российской Федерации произведен 81 взрыв, 33 из которых – для глубокого сейсмического зондирования земной коры. На втором месте стояла технология создания выработок-емкостей – подземных хранилищ в каменной соли для хранения газового конденсата (восемнадцать взрывов) [1]. Три емкости были созданы на Оренбургском газоконденсатном месторождении и пятнадцать – на Астраханском газоконденсатном месторождении.

В последние десятилетия социальная значимость «мирных» ядерных взрывов многократно возросла. Причин этому много. И прежде всего – это повышенная напряженность населения к различного рода радиационным инцидентам после чернобыльской катастрофы, пугающие публикации в средствах массовой информации о потенциальной опасности «мирных» ядерных взрывов и, конечно же, относительная близость их расположения к населенным пунктам [2].

Анализ публикаций на данную тему, в том числе и научных, показывает, что озабоченность общества по поводу «мирных» ядерных взрывов не беспочвенна. Ряд объектов находится фактически в бесхозном положении, на которых радиационный контроль если и проводится, то эпизодически, по требованию обеспокоенной общественности.

Радиационная обстановка на объектах, особенно на аварийных, и на тех, где в настоящее время отсутствует организованный радиационный контроль, может ухудшиться [3, 4]. В частности, может произойти выход радиоактивных продуктов ядерного взрыва по технологической (зарядной) скважине на земную поверхность, в эксплуатируемые коллекторы нефти, газа или подземных вод вследствие разрушения цементного камня затампонированной обсадной колонны или нарушения целостности цементного камня заколонного пространства.

В отличие от большинства объектов «мирных» ядерных взрывов, подземные хранилища в каменной соли для хранения газового конденсата обслуживаются подготовленным персоналом; на данных объектах радиационный мониторинг отлажен и производится в полном объеме и регулярно.

Однако целостность цементного камня забивочного комплекса и затрубья технологической скважины, исправность запорной арматуры гарантированно сохраняются только в течение 30–50 лет. В дальнейшем камень может разрушаться вследствие естественных процессов перекристаллизации и выщелачивания оксидов щелочных и щелочноземельных элементов пластовыми водами; инженерные же коммуникации выходят из строя в результате коррозии.

Эти процессы могут привести, и в некоторых случаях приводят, к выходу газового конденсата на устье зарядных скважин.

В настоящее время, после завершения научно-исследовательских и опытно-промышленных работ, а главное – после прекращения эксплуатации, объекты хранения газового конденсата, созданные подземными ядерными взрывами в каменных солях, подлежат консервации, точнее, временной изоляции от сферы человеческой жизнедеятельности.

В данной работе представляется обоснование безопасного долговременного хранения газового конденсата и радиоактивных рассолов в полостях каменной соли, образованных с применением ядерно-взрывных технологий. Расчеты и моделирование миграции радионуклидов выполнены по аналогии с системой долговременной безопасности захоронения радиоактивных отходов. Нам представляется, что если каменные соли по ряду показателей являются безопасными для захоронения радиоактивных отходов, то, соответственно, возможно обеспечение радиационной безопасности населения и при длительном хранении газового конденсата и радиоактивного рассола в соляных куполах.

15 подземных емкостей на Астраханском газоконденсатном месторождении (АГКМ) построили с применением ядерно-взрывной технологии в 1980–1984 гг. Из них 13 емкостей (1Т–13Т) объемом около 30 000 м³ каждая, разместили в соляном массиве Сеитовского поднятия, и две емкости, примерно по 10 000–12 000 м³ на Сары-Сорском (14Т) и Айдикском (15Т) соляных куполах. Глубина заложения подземных емкостей составляет около 1000 м.

Заполняющие (полностью или частично) полости подземных емкостей с газовым конденсатом рассолы являются жидкими радиоактивными отходами среднего уровня активности: в них в значимых концентрациях присутствуют изотопы ³H, ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr, в следовых – ²³⁹Pu, ²³⁵U, ²⁴¹Am.

В настоящее время основными источниками потенциальной опасности загрязнения окружающей среды стали относительно «короткоживущие» радионуклиды ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ³H, имеющие объемную активность, в среднем 2,6•10⁶ Бк/дм³, 10⁵ Бк/дм³, 10⁹ Бк/дм³ соответственно. Но, в соответствии с расчетами, выполненными в НПО «Радиевый институт имени В.Г. Хлопина», в рассоле в масштабе геологического времени α-излучатели также будут присутствовать в концентрациях, представляющих некоторую потенциальную угрозу радиоактивного загрязнения.

В соответствии с результатами расчетов, при моделировании миграции α-излучателей рассмотрению подлежит только изотоп плутония (²³⁹Pu) вследствие превышения им значений уровня вмешательства по НРБ-99/2009 [5] более чем в 10 раз. Повышение концентрации ²³⁹Pu в рассоле происходит за счет его диффузии в рассол из линзы переплавленной соли на дне емкости и из стенок емкости вне линзы.

Расчетная объемная активность ²³⁹Pu в рассоле емкостей, образованных термоядерным взрывом мощностью 8,5 кт в тротиловом эквиваленте, достигает максимума в 279 Бк/дм³ через 100 000 лет и далее снижается в соответствии с законом радиоактивного распада.

Расчеты диффузионного массопереноса выполнены на примере емкости 2Т фактическим объемом на 2005 г. – 1600 м³ (рис.1). При моделировании емкость представлена в виде шара радиусом 7,3 м; радиус ореольной зоны принят равным 100 метрам.

Массив каменной соли считается наиболее благоприятной средой для захоронения радиоактивных отходов, поскольку обладает незначительной проницаемостью (коэффициент фильтрации $K_{\phi} = 10^{-5} - 10^{-8}$ м/сут) и пластичностью, что позволяет ему оставаться герметичным вне зависимости от происходящих в нем деформаций и служить естественным основным барьером между подземной емкостью с газовым конденсатом и рассолом и окружающей средой на длительный период времени [6–10].

В качестве второго естественного изолирующего барьера на случай непредвиденной разгерметизации полости рассматривается 80-метровая надсолевая толща водопорных (палеогеновых) глин и наличие буферного терригенного коллектора.

В соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности» (НП-055-04), введенными в действие с 5 января 2005 г., безопасность пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) должна обеспе-

чиваться за счет последовательной реализации концепции глубоководной защиты, основанной на применении системы физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду, а также системы технических и организационных мер по защите физических барьеров и сохранению их эффективности.

Безопасность системы захоронения РАО (долговременная безопасность) должна обеспечиваться на основе реализации принципа многобарьерности, основанного на применении системы барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду, чтобы нарушение целостности одного из барьеров или вероятные внешние события природного или техногенного происхождения не привели к недопустимому снижению уровня безопасности системы захоронения РАО. Для ПЗРО глубокого заложения естественные барьеры (вмещающие горные породы) служат основным барьером.

Выше объекта захоронения РАО должен залегать буферный горизонт, отделенный от него слабопроницаемыми породами, способный обеспечивать локализацию отходов в случае их перетекания по нарушенному затрубному пространству. На объекте «Вега» – это акчагыльский водоносный горизонт.

Буферный горизонт должен перекрываться слабопроницаемыми породами, отделяющими его от вышележащих горизонтов.

Анализ гидрогеологических условий объекта «Вега» позволяет сделать вывод, что все требования нормативного документа удовлетворены, кроме того, каменная соль является одной из самых предпочтительных геологических формаций для глубинного захоронения радиоактивных отходов (РАО), как твердых, так и жидких.

В процессе закрытия емкостей технологические скважины герметизируются по всей высоте стволов бентонитовой глиной (с промежуточными цементными мостами), обладающей высокой сорбционной способностью и не меняющей своих свойств в масштабе геологического времени. Это – третий (инженерный) барьер, исключающий миграцию загрязнений из емкости фильтрационным путем [11].

Принципиальным вопросом является и восстановление нарушенного скважиной водопора, представленного глинами акчагыльского яруса, точнее, гидроизоляция затрубного пространства в этом интервале.

Для контроля над миграцией радионуклидов в подземных водах (как единственной среде возможного переноса радионуклидов из закрытых емкостей) предполагается организация наблюдений по сети скважин, пробуренных на все надсолевые водоносные горизонты.

В настоящей работе выполнены оценки диффузионного массопереноса радиоактивных изотопов по массиву каменной соли на оригинальной численной авторской модели для геологического масштаба времени [12].

При этом емкость 2Т условно рассмотрена в качестве уже законсервированного резервуара газового конденсата и рассола среднего уровня активности, содержащих совершенно определенное количество радионуклидов, в том числе и альфа-излучателей, находящихся в линзе переплавленной соли, но со временем выщелачиваемых жидкой фазой.

2 Т

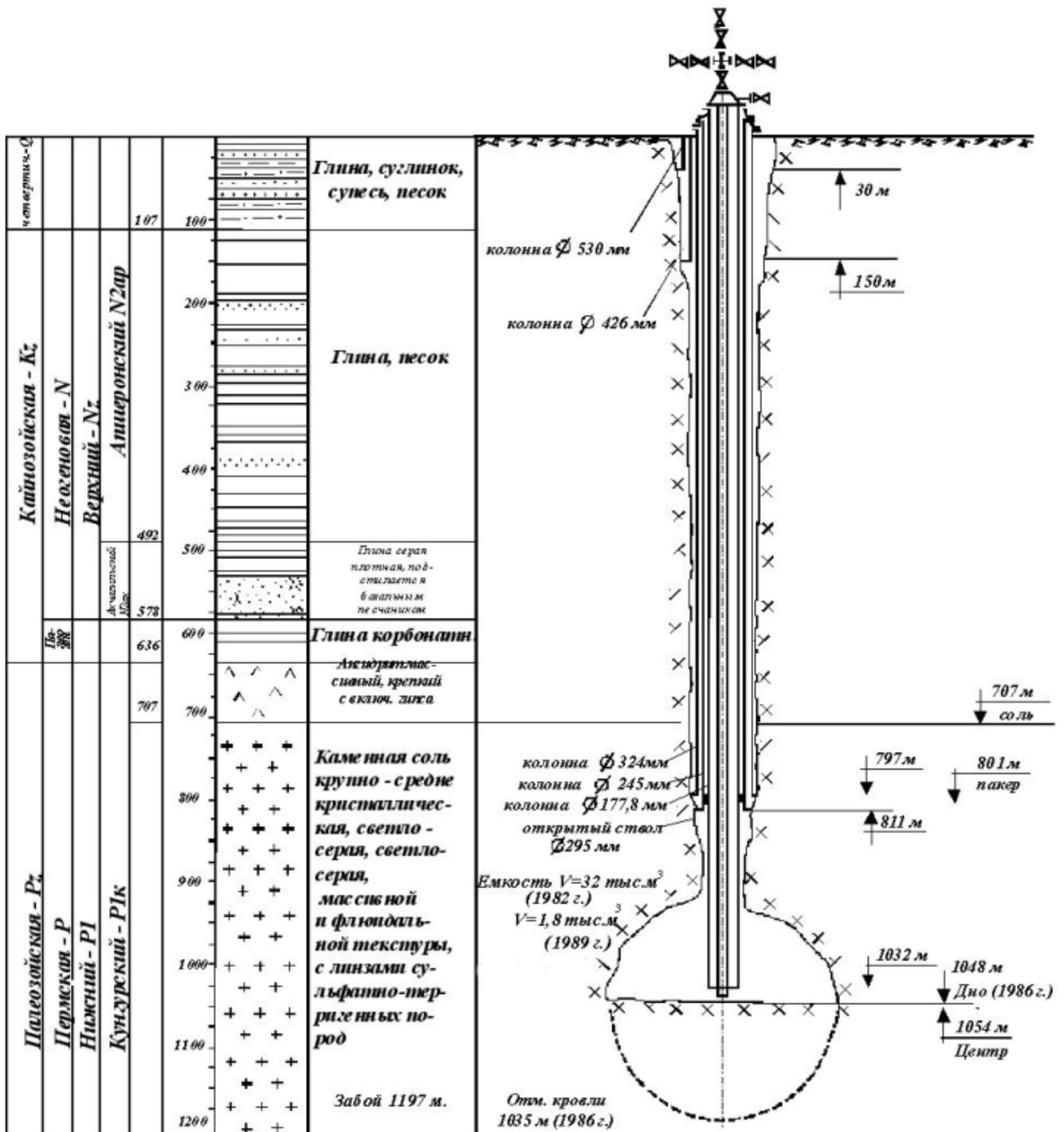


Рис. 1. Конструкция скважины и состояние подземной емкости 2Т по результатам обследований

Использована следующая расчетная схема: глубина залегания емкости – 1050 м; объем емкости – 1600 м³; объем рассола в емкости – 1600 м³; радиус зоны распространения цезия, стронция и трития в соли после взрыва – 100 м; мощность толщи соли в направлении кровли Сеитовского купола – 327 м; мощность толщи соли в направлении подошвы Сеитовского купола – 3000 м; расстояние до борта купола – 500 м; мощность кепрока – 65 м; мощность палеогеновых глин, перекрывающих кепрок, – 34 м; коэффициент диффузии по толще соли, в среднем: для ¹³⁷Cs – 10⁻⁸ см²/с; ⁹⁰Sr – 10⁻⁷ см²/с; ³H – 10⁻⁶ см²/с; ²³⁹Pu – 10⁻¹⁰ см²/с; максимальная суммарная активность (для всех радионуклидов в настоящее время, для ²³⁹Pu – через 100 000 лет): ¹³⁷Cs – 4,16•10¹² Бк; для ⁹⁰Sr – 1,6•10¹¹ Бк; ³H – 1,6•10¹⁵ Бк; ²³⁹Pu – 4,5•10⁸ Бк; пористость соли – 0,015.

Задача расчета диффузионного распространения радионуклида в окружающий камуфлетную полость соляной массив рассматривается в приближении сферической симметрии.

Исходное уравнение для решения задачи миграции радиоактивного вещества в этом случае имело вид:

$$n_0 \frac{\partial c}{\partial t} = D_0 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c}{\partial r} \right) - \lambda_p c, \quad (1)$$

где r – расстояние в радиальном направлении, м;
 n_0 – активная пористость соляного массива, доли ед.;
 c – объемная активность или концентрация компонента в жидкой фазе, Бк/м³, кг/м³ или кмоль/м³;

D_0 – коэффициент молекулярной диффузии радионуклида в соли, м²/год;

λ_p – постоянная радиоактивного распада компонента, связанная с периодом полураспада $t_{0,5}$ соотношением $\lambda_p = 0,693 / t_{0,5}$, 1/год.

На левой границе расчетной области задается значение концентрации радионуклида в жидкой фазе (в общем случае концентрация может быть переменной во времени, и этот вариант применен для расчета миграции плутония). На правой границе могут быть заданы следующие условия: непроницаемая граница, свободное прохождения потока через границу и нулевая концентрация радионуклида в жидкой фазе (условие смыва радионуклида). В настоящих расчетах использовано второе условие.

Для численного решения дифференциального уравнения (1) применен неявный многозначный метод, который обладает повышенной устойчивостью и дает возможность во время расчета автоматически контролировать величину шага по времени, выбирая его оптимальное значение. Данный метод позволяет на порядки снизить время проведения расчета по сравнению с традиционными методами. Для решения рассматриваемой задачи использована разновидность многозначного метода – четырехзначный метод Гира.

Результаты расчетов показали, что граница достижения уровней вмешательства (по НРБ-99/2009) для рассмотренных радионуклидов располагается на следующих расстояниях от границы полости (или ореольной зоны): ²³⁹Pu – 2,25 м, ¹³⁷Cs – 2,35 м, ⁹⁰Sr – 5,75 м, ³H – 14,2 м.

Перейдем теперь к оценке возможности выноса радиоактивных рассолов из ёмкости помимо диффузии.

Это возможно при нештатных, аварийных ситуациях, когда герметичность ёмкости или технологической скважины по каким-либо причинам нарушается.

Возможны различные причины аварийных утечек рассола, содержащего радионуклиды, из емкости после её закрытия; наиболее вероятные:

1) несанкционированное вскрытие ёмкости, например, при бурении скважины, заложенной на небольшом расстоянии от неё;

2) разгерметизация затрубного пространства (разрушение цементного камня) скважины.

Рассматривая утечки из подземных емкостей, необходимо учитывать следующее.

В подземных выработках-емкостях идут долговременные процессы, в результате которых содержимое выработки и породный массив переходят в равновесие вследствие выравнивания температуры, повышения концентрации рассола до максимальной (при данных термодинамических условиях) за счет растворения стенок емкости, а также конвергенции стенок емкости из-за вязкопластических деформаций каменной соли.

Видимым проявлением этих процессов является повышение давления в выработке-емкости, которое со временем стабилизируется. Величина установившегося давления зависит от горно-геологических условий и свойств каменной соли; если выработка закрыта, то вследствие ползучести соли величина давления в рассматриваемых емкостях больше величины естественного давления подземных вод на данной глубине (гидростатического давления). Вследствие этого негерметичность емкости приведет к выдавливанию жидкости из емкости в окружающий породный массив, вероятно – в водоносные горизонты.

При несанкционированном бурении в зоне специально-горного отвода разведочная или эксплуатационная скважина для газа, нефти и т. п. может вскрыть ёмкость или пройти ореольную зону с содержащим радионуклиды рассолом. Рассол, находящийся под давлением, в этом случае изливается в скважину и смешивается с буровым раствором.

В результате загрязняется буровое оборудование, в том числе ёмкости для буровой жидкости, а также может быть загрязнена территория вокруг бурового станка. С учетом рельефа и характера грунта (песок) может быть загрязнено до 0,1 га территории.

Для серьёзных последствий такой разлив слишком мал.

В аридном климате радионуклиды не обязательно достигнут водоносного горизонта, который расположен на глубинах примерно 5–7 м, но может образоваться загрязненная зона в ненасыщенном водой грунте (это подтверждают натурные исследования).

Дальнейшее распространение загрязняющих веществ могло бы произойти за счёт выщелачивания (размыва осадками). Однако при своевременных противоаварийных действиях на участке (например, удаление или гидроизоляция сверху загрязненной почвы) можно не допустить рассеивания или проникновения радионуклидов в грунтовые воды.

Устранение возможности дальнейшего развития аварии и продолжения истечения рассола должно осуществляться путем цементирования ствола и ликвидации скважины, вскрывшей ёмкость.

Разрушение или потеря герметичности инженерного барьера (затампированных скважины и затрубного пространства) может произойти вследствие естественных коррозионных или тектонических процессов. Разгермети-

зация может принять значительные масштабы в случае некачественного тампонирувания скважины при её строительстве. Наиболее «тяжелые» условия существования инженерного барьера соответствуют нижней части скважины, где действуют максимальные механические нагрузки, максимальные температуры и коррозионный фактор.

Следует ожидать, что обсадная труба и крепь скважины в целом будут разрушаться сначала вблизи кровли емкости, в интервале залегания каменной соли. Со временем крепь скважины может выходить из строя и на меньших глубинах. Масштабы утечки определяются проницаемостью тампонажного цементного камня. Монолитный цементный камень и контактные зоны между тампонажным камнем и металлом обсадных труб имеют весьма низкую проницаемость – $10^{-7} \dots 10^{-10}$ мкм².

При искусственном нарушении контакта «цемент – металл» путем сдвига металла проницаемость существен-

но возрастает – до величин $10^{-1} \dots 10^{-4}$ мкм². Таким образом, для монолитного тампонажного камня коэффициент фильтрации составляет примерно $0,5 \times (10^{-7} \dots 10^{-10})$ м/сутки, а для нарушенных образцов – $0,5 \times (10^{-1} \dots 10^{-4})$ м/сутки.

Проведены расчеты с целью определения количества рассола, которое может проникнуть в водоносные горизонты при утечке.

Предполагается, что рассол мигрирует по затрубному пространству скважины, при этом цементный камень нарушен и имеет одинаковую по длине скважины проницаемость. На участках водоупоров, разделяющих водоносные горизонты (Акчагыльский, Апшеронский, Бакинский, Хазарский, Хвалынский), происходит только вертикальная миграция рассола по затрубному пространству. В интервале залегания водоносного горизонта вероятна фильтрация в него части рассола. Схема расчётной модели приведена на рисунке 2.

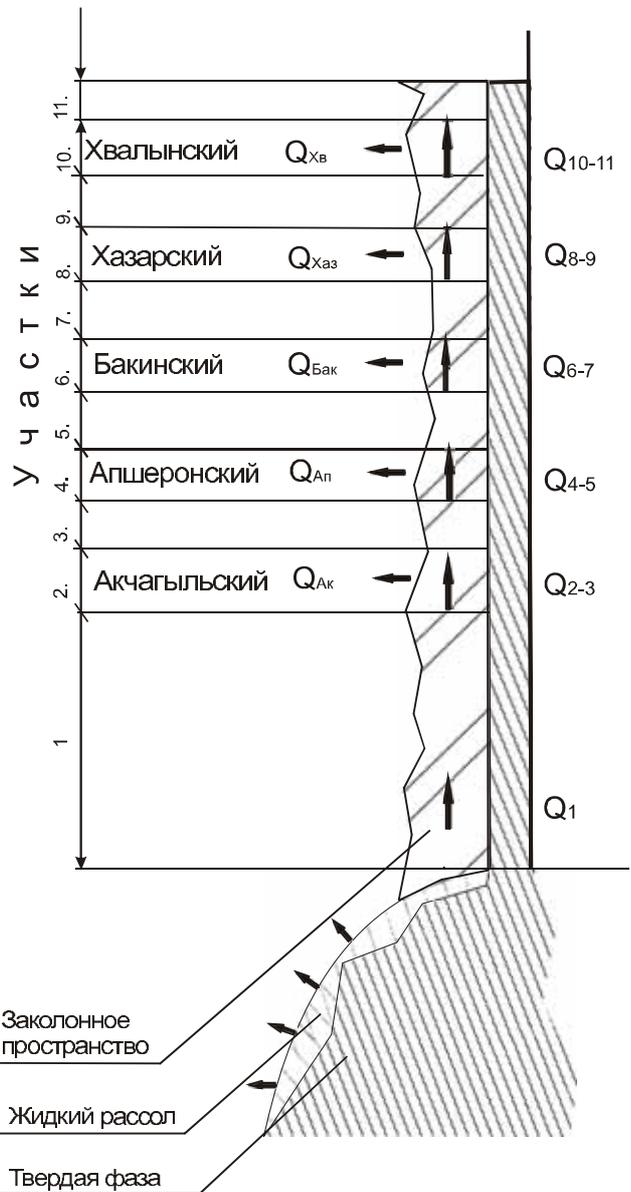


Рис. 2. Схема миграции рассола из выработки-ёмкости

Расход фильтрата определяется фильтрационными параметрами водоносных горизонтов и цементного камня в заколонном пространстве.

Как известно, физически эти параметры связаны зависимостями:

$$Q_i = \frac{F_i \cdot k_i \cdot k_{гг}}{\rho_i}, \quad (2)$$

$$Q_{вод} + Q_{зп} = Q_{\Sigma}, \quad (3)$$

где $Q_i, Q_{вр}, Q_{зп}, Q_{\Sigma}$ – расход фильтрата в каком-либо из коллекторов (Q_i – в выражении (2) относится и к заколонному пространству, и к водоносному горизонту), в водоносном горизонте ($Q_{вр}$), в заколонном пространстве ($Q_{зп}$) и сумма расходов (Q_{Σ});

F_i – площадь фильтрующей поверхности;

ρ_i – плотность флюида (рассола);

k_i – коэффициент фильтрации фильтрующего материала;

$k_{гг}$ – гидравлический градиент.

Распределение потока фильтрата на каждом участке, где коллектор с рассолом вдоль обсадной колонны гидравлически связан с водоносными горизонтами, определяется решением системы уравнений относительно искомым значениям $Q_i, Q_{вр}, Q_{зп}$.

Результаты расчётов для ёмкости 2Т приведены в таблице 1.

В таблице 1 показано, что даже при весьма маловероятном предположении постоянства проницаемости тампонажного камня по длине скважины загрязнение верхних водоносных горизонтов исключено и при недостижимо большом коэффициенте фильтрации цементного камня.

Представляется очевидным, что в случае утечки гораздо более вероятной является миграция по затрубному пространству с разгрузкой в надсолевой акчагыльский горизонт.

Поступая в водоносный горизонт, рассол на начальном этапе занимает определенный объем его порового пространства и затем, вследствие разности в плотностях рассола и насыщающей пласт жидкости, опускается (скапливается) в подошвенной части пласта. В дальнейшем может происходить продвижение рассола по подошвенной части водоносного горизонта в направлении естественного движения пластовых вод, но наиболее вероятно, что

рассол останется в понижениях микрорельефа нижнего водоупора акчагыльского горизонта и радионуклиды будут поступать в естественный фильтрационный поток диффузионным путем.

Но мы рассмотрим наиболее консервативный случай: скорость миграции рассола равна действительной скорости движения пластовых вод. По имеющимся региональным данным, действительная скорость фильтрации подземных вод по апшеронскому, акчагыльскому и другим горизонтам весьма мала.

Степень и величина загрязнения, созданные этим типом утечки, зависят от гидрогеологических характеристик водоносного горизонта, интенсивности утечки, продолжительности разгрузки, а также вязкости жидкости и сорбционной способности радионуклидов.

На основании этих данных рассчитаны максимально возможные расстояния миграции рассола в водоносных горизонтах через 5, 10, 100 лет с момента поступления рассола. Результаты расчета приведены в таблице 2.

Следует повторить, что фактические расстояния растекания рассола будут меньше расчетных примерно на порядок, так как, мигрируя по подошвенной части пласта, рассол будет заполнять понижения рельефа подошвы, скапливаясь в естественных ловушках.

Кроме того, не учтено гетерогенное взаимодействие примесей с вмещающими породами, вследствие которого радионуклиды будут мигрировать с еще меньшей скоростью.

Для оценки риска облучения людей, помимо представлений о количестве мигрирующих вредных веществ и условий, определяющих интенсивность и продолжительность истечения жидкости из емкости и ее миграции, необходима оценка вероятности реализации данных сценариев.

Для условий Астраханского газоконденсатного месторождения налицо факторы, значительно снижающие риск по сравнению с приведенными величинами:

- отсутствуют питьевые водоносные горизонты;
- в наличии непитьевые надсолевые водоносные горизонты, которые будут аккумулировать вредные вещества в случае их утечки из емкости;
- отсутствуют близко расположенные населенные пункты;
- отсутствуют близко расположенные пункты водозабора;

Таблица 1

Утечка рассола из емкости в водоносные горизонты при различных коэффициентах фильтрации

Коэффициент фильтрации, м/сут.	Размерность	Утечка рассола из емкости в водоносные горизонты, м ³ /год				
		акчагыльский	апшеронский	бакинский	хазарский	хвалынский
5,18×10 ⁻¹	м ³	5,61×10 ²	1,03×10 ³	8,73	0	0
	доля	3,51×10 ⁻¹	6,44×10 ⁻¹	5,46×10 ⁻³	0	0
5,18×10 ⁻²	м ³	1,35×10 ³	2,50×10 ²	0	0	0
	доля	8,44×10 ⁻¹	1,56×10 ⁻¹	0	0	0
5,18×10 ⁻³	м ³	1,57×10 ³	2,91×10 ¹	0	0	0
	доля	9,82×10 ⁻¹	1,82×10 ⁻²	0	0	0
5,18×10 ⁻⁴	м ³	1,60×10 ³	2,96	0	0	0
	доля	9,98×10 ⁻¹	1,85×10 ⁻³	0	0	0
5,18×10 ⁻⁵	м ³	1,60×10 ³	0	0	0	0
	доля	1,00	0	0	0	0

Таблица 2

Расчетные расстояния миграции рассола в водоносных горизонтах надсолевой части разреза

Наименование параметров	Размерность	Водоносные горизонты				
		акчагыльский	апшеронский	бакинский	хазарский	хвалынский
Усредненная глубина залегания горизонта	м	600	300	110	35	10
Коэффициент фильтрации	м/сут	$3 \cdot 10^{-2}$	1	0,6	0,7	5
Действительная скорость фильтрации пластовых вод	м/год	0,6	7,3	5,8	5,1	18,3
Радиус распространения рассола с учетом гравитационной деформации	м	2,56	11,27	6,53	5,18	14,75
Максимальное расстояние растекания за время:						
5 лет	м	5,5	47,7	35,5	30,6	106,2
10 лет		8,5	84,2	64,5	56,1	197,7
100 лет		62,5	741,2	586,5	515,1	1844,1

– подземные емкости имеют собственную зону санитарной охраны и специальный горный отвод, препятствующие хозяйственной деятельности и использованию подземных вод в районе их расположения;

– имеется система мониторинга подземных вод.

Безусловно, если не предпринимать мер по гидроизоляции открытого ствола скважины в интервалах развития каменной соли и кепрока, поступление радиоактивного рассола из подземной емкости в акчагыльский водоносный горизонт возможно и достаточно вероятно, тем более что наиболее обоснованной возможностью поступления воды в первоначально сухие емкости является обводнение именно по затрубному пространству обсадных колонн из вышезалегающих водоносных горизонтов: акчагыльского и апшеронских.

Мы предлагаем использовать для герметизации подбашмачного пространства мягкопластичное «тесто» активированного (натриевого) бентонита массовой влажностью 80–100%, изолирующая способность которого изучена нами в лабораторных и натуральных условиях на объектах Красноярского горно-химического комбината.

Математическое моделирование диффузионного массопереноса плутония, урана, цезия и стронция (на основании значений коэффициентов распределения и диффузии для каждого изотопа, полученных эмпирическим путем) показало, что толщины слоя в восемь-десять метров достаточно для полного удержания радионуклидов при концентрациях (активностях), характерных для рассолов подземных емкостей объекта «Вега».

Технически бентонит будет подан через перфорационные отверстия обсадных колонн на прослой специального геля плотностью 1,18–1,20 г/см³ после загустевания последнего (так как объемная масса бентонитового «теста» указанной влажности достигает 1,4–1,5 г/см³, в рассоле без геля, плотностью 1,20–1,22 г/см³, бентонит будет «тонуть»).

Таким образом, длительное хранение газового конденсата и радиоактивного рассола в законсервированных подземных резервуарах, образованных с применением ядерно-взрывных технологий в соляных куполах на территории АГКМ, не приведет к радиоактивному загрязнению поверхности и облучению населения. Следовательно, такое состояние подземных резервуаров, образованных с применением ядерно-взрывных технологий, можно считать безопасным.

Полученные в результате нашего исследования выводы послужили обоснованием для разработки проекта санитарных правил «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности на объектах хранения газового конденсата в подземных резервуарах, образованных с применением ядерно-взрывной технологии».

В проекте санитарных правил регламентируются санитарно-гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при обслуживании подземных резервуаров для хранения газового конденсата, образованных с применением ядерно-взрывной технологии, до консервации, разработке проектов их консервации, проведении работ по консервации, а также при обслуживании уже законсервированных подземных резервуаров для обеспечения радиационной безопасности персонала данных объектов и проживающего в районе их расположения населения.

Литература

1. Рамзаев, В.П. Мирные ядерные взрывы: проблемы и пути обеспечения радиационной безопасности населения / В.П. Рамзаев, В.С. Репин, Е.В. Храмцов // Радиационная гигиена. – 2009. – Т. 2, № 2. – С. 27–33.
2. Архангельская, Г.В. Субъективные оценки радиационного риска на территориях, прилегающих к местам проведения мирных ядерных взрывов / Г.В. Архангельская [и др.] // Радиационная гигиена. – 2009. – Т. 2, № 2. – С. 34–39.
3. Рамзаев, В.П. Радиационно-гигиенический мониторинг в местах применения ядерно-взрывных технологий в мирных целях и расчет доз облучения критических групп населения / В.П. Рамзаев [и др.] // Радиационная гигиена. – 2009. – Т. 3, № 1. – С. 33–39.
4. Зеленцова, С.А. Общественное мнение о мирных ядерных взрывах в Пермском крае / С.А. Зеленцова, Г.В. Архангельская, И.А. Зыкова // Радиационная гигиена. – 2009. – Т. 3, № 1. – С. 5–9.
5. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормы (СанПиН 2.6.1.2523 – 09): утв. и введ. в действие от 01 сентября 2009 г. взамен СанПиН 2.6.1.758-99. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.
6. Tomasko, D. Risk analysis for disposing nonhazardous oil fields wastes in soil caverns / D. Tomasko [et al.]. – U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy Under Contract W-31-109-ENG-38. Prepared by: Argonne National Laboratory Argonne, IL December 1997.

7. John, A. Costs for off – site disposal of nonhazardous oil field wastes: Salt caverns versus other disposal methods. Veil Argonne National Laboratory Environmental Assessment Division 9700 S. Cass Avenue Argonne, IL 60439 for U.S. Department of Energy Assistant Secretary for Fossil Energy April 1997 Argonne National Laboratory is operated by the University of Chicago under Contract W-31-109-Eng-38, for the U.S. Department of Energy.
8. Wastes, J. Evaluation of slurry injection technology for management of drilling. / J. Wastes, A. Veil, B. Maurice. – Dusseault Argonne National Laboratory. Prepared for: U.S. Department of Energy National Petroleum Technology Office under Contract W-31-109-Eng-38 May 2003.
9. Markus, G. Compendium of regulatory requirements governing underground injection of drilling wastes / G. Markus, B. Bryson, A. John. – Prepared for: U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Petroleum Technology Office under Contract W-31-109-Eng-38. Veil Argonne National Laboratory February 2003.
10. Veil, J. Disposal of Norm – Contaminated Oil Field Wastes in Salt Caverns // J.A. Veil [et al.]. – Prepared for: U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Petroleum Technology Office under Contract W-31-109-Eng-38. Prepared by: Williams Argonne National Laboratory. August 1998.
11. Спешилов, С.Л. К вопросу об интерпретации результатов геомиграционных наблюдений и экспериментов на радиационных объектах / С.Л. Спешилов // «АНРИ». – 2008. – №4 (55). – С. 32–38.
12. Гупало, Т.А. Разработка математических моделей для прогнозирования на длительные периоды времени миграции комплексного радиоактивного загрязнения для оценок риска при подземном захоронении ВАО / Т.А. Гупало, В.И. Голяков, С.Л. Спешилов // Информационный бюллетень «Ядерная и радиационная безопасность России». – 2002. – Выпуск 3 (6). – М.: ФГУП «ЦНИИ атоминформ». – С. 60–67.

I.K. Romanovich¹, S.L. Speshilov², M.K. Teplov²

Radiation safety justification for the long-term storage of gas condensate in the underground reservoirs formed by the nuclear explosion technology

¹ Federal Scientific Organization «Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev» of Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being, Saint-Petersburg

²JSC «Podzemgazprom», Moscow

Abstract. The paper presents approaches to the safety justification of the gas condensate and brine long-term storage in the underground reservoirs formed by the nuclear explosion technology. Gas condensate and brine are the intermediate level liquid radioactive waste containing isotopes: ^3H , ^{137}Cs and ^{90}Sr ; in traces – ^{239}Pu , ^{235}U , ^{241}Am . Safety of the gas condensate and brine long-term storage in the underground reservoirs is assessed on the base of the multi-barrier principle implementation, used during radioactive waste disposal. It is shown that the gas condensate and brine long-term storage in the sealed underground reservoirs formed by nuclear explosion technologies in salt domes does not lead to the surface radioactive contamination and population exposure.

Key words: peaceful nuclear explosions, gas condensate, radioactive brine, salt dome, nuclear explosion technologies, artificial radionuclides, population exposure, diffusion mass transfer of radioactive isotopes, aquifers.

Поступила 18.05.2010 г.

И.К. Романович
Тел: (812) 233-53-63
E-mail: irh@ek6663.spb.edu