

УДК 621.039.75

## Изучение возможности снижения последствий тяжелой аварии на подземном объекте хранения отработавшего ядерного топлива

А.В. Наумов

Горный институт КНЦ РАН

**Аннотация.** В статье изложены результаты исследовательской работы по оценке радиационных последствий взрыва в подземном хранилище отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Моделирование пространственной структуры течений в условиях прекращения действия системы вентиляции показало возможность предотвращения радиоактивного выброса аэрозолей из хранилища за счет предлагаемых систем пассивной безопасности.

**Abstract.** In the paper the results of research work estimating radiation consequences of explosion in underground storage of the spent nuclear fuel have been considered. The simulation of spatial pattern of flow for the variant of ventilating system stopping has shown capability of exception of radioactive aerosol release from storage due to proposed systems of passive safety.

**Ключевые слова:** отработавшее ядерное топливо, подземное хранилище, радионуклиды, перенос, аэрозоли, взрыв, выброс  
**Key words:** spent fuel, underground storage, radionuclides, transport, aerosole, explosion, release

### 1. Введение

Концепция обращения с отработавшим ядерным топливом в РФ подразумевает переработку, для чего все перерабатываемое ОЯТ должно быть вывезено к 2018 году, а неперерабатываемые отходы – помещены на безопасное хранение к 2015 году. К неперерабатываемому ОЯТ ледокольного флота относится уран-циркониевое топливо, которое можно в течение определенного времени хранить в предложенном Горным институтом региональном приповерхностном хранилище, представляющем современный подземный комплекс (*Мельников и др.*, 2003). ГоИ в течение ряда лет изучает возможность повышения безопасности хранения радиоактивных отходов (РАО) и ОЯТ путем их размещения в подземном хранилище на глубине 100 м в массиве скальных пород.

При этом необходимо учитывать степень безопасности временного хранилища ОЯТ в плане существующей угрозы осуществления терактов, в том числе на ядерных объектах. В соответствии с российскими нормами и правилами, для проекта объекта хранения ОЯТ необходима экологическая экспертиза и оценка аварийного воздействия на окружающую среду. В данной статье изложены некоторые возможности предотвращения загрязнения окружающей среды за счет подземного размещения при организованном террористами взрыве в модуле хранения транспортно-упаковочных комплектов ТУК-108 (далее – контейнеры) с неперерабатываемым уран-циркониевым ОЯТ.

Идея повышения безопасности атомных объектов за счет их подземного размещения длительное время развивалась в Горном институте в плане исследования аспектов безопасности подземных АЭС и хранилищ РАО. К решению проблемы были привлечены крупнейшие исследовательские и проектные институты. Однако на определенном этапе исследований стало высказываться мнение о том, что подземное размещение дорого и, главное, не защищает от последствий тяжелой аварии. Данное мнение сформировалось на основе результатов расчетов по так называемым сосредоточенным и одномерным моделям.

Однако в рамках более детального изучения динамики нестационарных процессов в подземном хранилище на основе более детальных пространственных компьютерных моделей недавно получены **новые** результаты, частично представленные в данной работе.

Сценарий аварии предполагает тепловой (неядерный) взрыв контейнера с ОЯТ, заполненного террористами жидкой взрывчаткой в подземном хранилище, расположенном в массиве кристаллических скальных пород на глубине 100 метров (см. рис. 1), при этом энергия взрыва составляет около 1,5 ГДж.

### 2. Моделирование аварии

Данная работа рассматривает физическую модель протекания аварии и воздушный выброс радиоактивных веществ (РВ) из аварийного помещения хранилища в систему выработок, связанных с атмосферой.

Модель аварии представлена следующими составляющими:



Рис. 1. Принципиальная схема аварии на подземном хранилище неперерабатываемого ОЯТ

- феноменологическая интерполяция выброса РВ при тяжелых авариях для типичных групп химических соединений;
- описание взрывных процессов в геометрии связанных выработок;
- модель нестационарного течения газовой струи, загрязненной радиоактивными аэрозолями, включающая эффекты свободной и вынужденной конвекции в односкоростном приближении переноса;
- модель осаждения аэрозолей на поверхностях выработок, позволяющая оценить как осаждение, так и выход РВ в окружающую среду;
- модель переноса и осаждения аэрозолей на земную поверхность РВ и радиологическое воздействие на население Мурманской области.

Оценка образования радионуклидов в судовом ядерном реакторе выполнена в работе (Мельников и др., 2003). Для формирования источника загрязнения предполагается, что в хранилище содержится топливо, образованное при эксплуатации атомного флота и не перерабатываемое в настоящее время на предприятиях топливного цикла РФ. Например, в отработавшей 1300 суток активной зоне ледокольной установки ОК-900А содержится 2,2 кг  $^{239}\text{Pu}$ , 3,0 кг  $^{137}\text{Cs}$ , 0,8 кг  $^{85}\text{Kr}$ , 1,8 кг  $^{90}\text{Sr}$ .

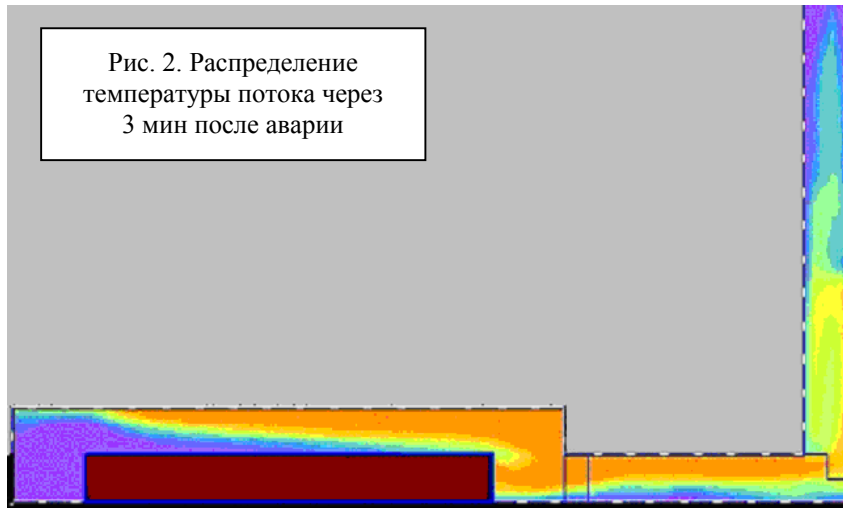
Доля радиоактивных веществ, вышедших при взрыве из ОЯТ, получена путем обобщения опытных данных по различным авариям, включая аварию на ЧАЭС. В частности, рассмотрены долгоживущие радиоактивные изотопы  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238,239}\text{Pu}$  и другие нуклиды, для которых предполагаемый выход варьирует от долей процента до 100 % (инертный газ  $^{85}\text{Kr}$ ).

На втором этапе подготовлены исходные данные для описания источников энергии, импульса, а также активности вышедших в атмосферу хранилища РВ, составляющей в сумме свыше 5000 Кюри. Температура атмосферы аварийного помещения, полученная в предположении аддитивного смешения продуктов взрыва с атмосферой помещения при изохорном процессе, составляет 110°C. В другом варианте, поскольку аварийное помещение не изолировано, предполагается, что образовавшаяся горячая смесь воздуха с продуктами сгорания испытывает быстрое расширение в адиабатическом режиме. При этом на совершение работы расширения по первому началу термодинамики тратится часть энергии, что приводит к оценке средней температуры среды аварийного выброса значением 70°C.

Полученная температура, а также геометрия выработок, образующих канал "аварийное помещение – система горизонтальных, наклонных и вертикальных выработок – атмосфера" используется в модели расчета по программам пространственной динамики течения: португальского кода EasyCFD (Lopes, 2007) и разработанной в Горном институте программы SIM.

В этих программах моделируется течение нестационарного потока по каналу в двумерной и трехмерной геометрии, а также термические эффекты: теплообмен со стенкой и режим естественной конвекции. В разработанном сценарии аварии описана геометрия, поперечные и вертикальные размеры, а также начальные и граничные условия. В результате проведенных расчетов данного сценария установлено, что на особенности течения и переноса радиоактивных веществ (РВ) в подземном хранилище, **в отличие от наземных сооружений**, оказывают существенное влияние:

- большое отношение площади стен к объему канала;
- значительная длина подземных выработок;
- наличие поворотов и изменений поперечного сечения потока, из них наиболее важны для процесса осаждения выходы из аварийного помещения;

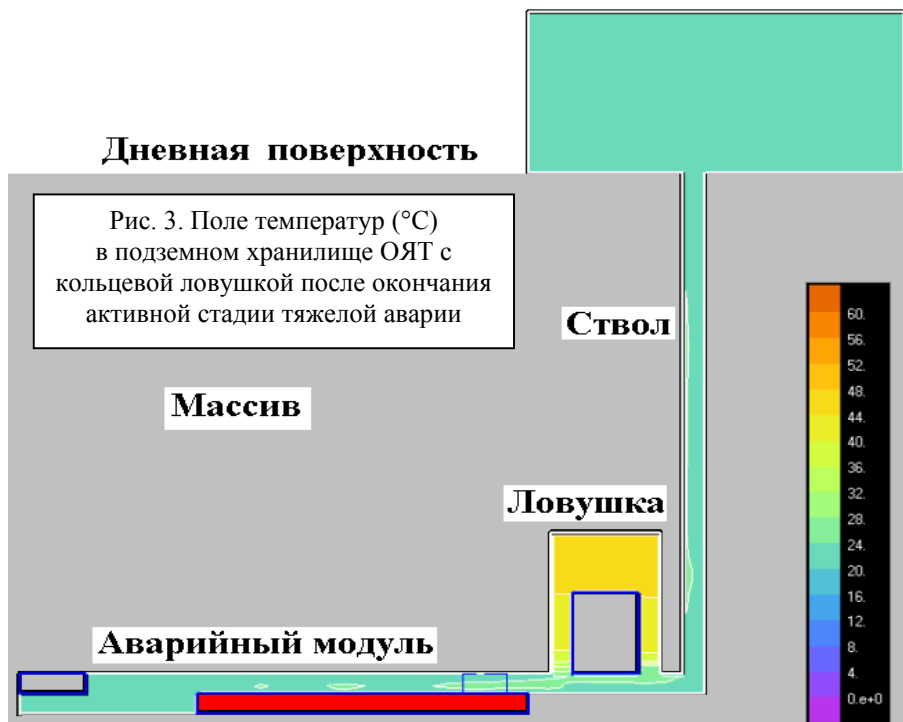


- образование вихревых зон в тракте течения, вследствие чего наблюдается перемешивание струи выброса с холодным воздухом, а также выпадение аэрозолей на поверхность выработок.

Перечисленные факторы способствуют удержанию аэрозольной компоненты выброса в атмосфере хранилища и на поверхности выработок, и, следовательно, уменьшению концентрации РВ в струе, вытекающей из хранилища в атмосферу. На рис. 2 представлена характерная картина распределения температуры потока в режиме вынужденной конвекции. Максимальная температура, 70°C, наблюдается в верхней части аварийного помещения. Кроме того, проявляется наличие вихревых зон и зон разделения горячей (загрязненной) среды.

Представленное на рис. 3 типичное поле температуры для варианта с ловушкой кольцевого типа и режима вынужденной конвекции показывает накопление горячей и, следовательно, загрязненной среды в объеме ловушки после окончания активной стадии аварии. Данная среда, представляющая смесь воздуха, продуктов сгорания и радиоактивных аэрозолей, в дальнейшем постепенно остывает, при этом значительная часть аэрозолей осаждается на горизонтальные поверхности.

На основе результатов серии расчетов температуры и поля скорости потока было исследовано осаждение аэрозолей в результате седиментации, инерционного осаждения, термопреципитации и диффузиофореза в различных вариантах режимов конвекции и конструкции выработок. При этом предполагалось, что исходные параметры аэрозолей подчиняются распределению Мартина – Андреасена.



Расчеты показали, что наибольшее влияние на процесс осаждения оказывает седиментация – выпадение более крупных частиц размером 10-100 мкм в аварийном помещении, а также на прилегающих к нему участках вентиляционно-сборочной галереи, транспортной галереи и в камере очистки воздуха, а также инерционное осаждение аэрозолей на стенках. Аэрозоли данного размера переносят большую часть радиоактивности и, осаждаясь, вызывают сильное загрязнение аварийного модуля и ближайших по направлению потока выработок хранилища. Медленнее осаждаются средние частицы размером около 10 мкм при течении струи по транспортному уклону. Инерционное осаждение является причиной локального выпадения аэрозолей при поворотах потока и вихрях.

Последовательное интегрирование выпавшей активности аэрозолей за счет процессов выведения показало уменьшение выброса РВ из хранилища в случае останова вентиляции в 3-4 раза по сравнению с вариантом сохранения расхода вентиляции. При этом вынос происходит только за счет процесса естественной конвекции, которая может быть замедлена путем применения активных и пассивных способов противоаварийной защиты. К пассивным средствам защиты ОС относятся специальные выработки-ловушки горячей составляющей потока выброса, накапливающие на своих поверхностях вышедшую при взрыве радиоактивность. Отметим, что в случае наземного размещения хранилища ОЯТ инженерные сооружения, играющие роль систем безопасности, в результате теракта могут быть легко разрушены, в отличие от таких природных систем, как массив скальных пород, служащий своеобразной защитной системой. Полученные результаты позволяют предположить, что, вследствие очищения воздушного выброса РВ в выработках значительной протяженности и при достаточной глубине хранилища, а также благодаря другим конструктивным особенностям данного объекта, подземное размещение ОЯТ более предпочтительно с точки зрения ограничения выброса в окружающую среду (ОС) при тяжелых авариях по сравнению с хранилищами наземного типа.

На следующем этапе моделирования выполнены расчеты осаждения воздушного выброса РВ по программе COSYMA (Jones, 1995). В данной подмодели принят максимальный выброс радиоактивности в ОС, соответствующий отсутствию специальных ловушек и варианту продолжения действия вентиляции. Характерный размер выходящих в атмосферу аэрозолей принят равным 1 мкм. С целью расчета радиологических последствий дисперсии радиоактивных аэрозолей была оцифрована карта размещения населения в радиусе до 130 км от представительной площадки хранилища ОЯТ на побережье Сайда-губы. Для набора годовых последовательностей характерных для Мурманской области погодных условий получены варианты распределения загрязнения территории РВ, дозовых нагрузок и медицинских последствий. Основными дозообразующими радионуклидами на площадке объекта являются  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{238}\text{Pu}$ . Радиационное воздействие вне площадки подземного хранилища остается в пределах нормы.

### 3. Заключение

Для выбранного сценария взрыва контейнера с ОЯТ в подземном хранилище на глубине 100 м, согласно расчетам, из горячего воздуха и продуктов сгорания образуется горячий факел со средней температурой около 70°C, который распространяется по системе горизонтальных, наклонных и вертикальных выработок с переменной скоростью. При этом на нижних отметках хранилища возникают условия локальной циркуляции и выведения части аэрозолей. Кроме того, часть выброса задерживается в тупиковых объемах выработок, в ловушках. В целом, значительная часть выброса радиоактивных аэрозолей остается под землей, и возникает возможность предотвращения попадания их в атмосферу и на поверхность земли.

Подземное размещение хранилища ОЯТ на глубине порядка 100 м в скальных породах может обеспечить многократное снижение радиозоологических последствий теракта/аварии вследствие очищения воздушного выброса РВ благодаря значительной протяженности и достаточной глубине заложения выработок, а также другим конструктивным особенностям данного объекта.

### Литература

- Jones J.A.** PC COSYMA (Version 2): An accident consequence assessment package for use on a PC. CEC, Brussels, EUR 16239, 60 p., 1995.
- Lopes A.M.G.** ADAI, Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra, Portugal. 2007. URL: <http://www.easycfd.net/>.
- Мельников Н.Н., Конухин В.П., Наумов В.А., Амосов П.В., Гусак С.А., Наумов А.В., Катков Ю.Р.** Отработавшее ядерное топливо судовых энергетических установок на европейском Севере России. Часть 1. *Апатиты, КНЦ РАН*, 166 с., 2003.