

УДК 621.039.546.3

Контейнерное хранение проблемных видов отработавшего ядерного топлива судовых реакторных установок: аспекты тепловой безопасности

В.А. Наумов¹, С.А. Гусак^{1,2}

¹ Горный институт КНЦ РАН

² Горный факультет КФ ПетрГУ, кафедра горного дела и обогащения

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы влияния теплового фактора на выбор конструктивно-компоновочных решений хранилища проблемных видов корабельного отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), накопленного в Мурманской области. Приведены основные положения методики расчета и результаты прогнозных оценок теплового режима подземного хранилища ОЯТ.

Abstract. In the paper the issues of thermal factor influence on choice of layout of storage facility for problem types of ship spent nuclear fuel (SNF) accumulated in the Murmansk region have been considered. The principles of the calculation method and the results of thermal regime assessments of underground storage facility for SNF have been presented.

Ключевые слова: отработавшее ядерное топливо (ОЯТ), судовые ядерные энергетические установки, хранилище (ОЯТ), остаточное тепловыделение, тепловая безопасность, математическое моделирование

Key words: spent nuclear fuel (SNF), ship nuclear power units, SNF storage facility, residual heat, thermal safety, mathematic modeling

1. Введение

В концептуальном отношении решение проблемы обращения с ОЯТ судовых ядерных энергетических установок (ЯЭУ) в Мурманской области базируется на государственной стратегии использования замкнутого топливного цикла, согласно которой облученное топливо должно направляться на радиохимическую переработку на производственном объединении "Маяк". Однако из реализованных на сегодняшний день технологий переработки ОЯТ выпадают уран-циркониевое топливо водо-водяных реакторов атомных ледоколов и уран-бериллиевоое топливо АПЛ с жидкометаллическими реакторами. Наряду с указанными видами ОЯТ, содержащими неперерабатываемые топливные композиции, к категории проблемных видов облученного топлива также относятся дефектные отработавшие тепловыделяющие сборки (ОТВС), не соответствующие нормативным требованиям к топливу, отправляемому на переработку, или имеющие значительные повреждения топливной части (фрагментация твэлов, просыпи топливной композиции и т.п.) (Шишкин, 2007). В настоящее время значительная часть проблемных видов ОЯТ хранится в условиях, не отвечающих современным требованиям по обеспечению безопасности. При этом сроки хранения отдельных видов ОЯТ составляют 30 и более лет.

Отсутствие технологии переработки проблемных видов топлива обусловило объективную необходимость принятия Росатомом решения о продленном хранении такого ОЯТ в специально созданных для этой цели металлбетонных контейнерах и в наземных хранилищах до появления в России соответствующих технологий переработки. Очевидно, что отложенное решение проблемы, каким является временное хранение облученного топлива, не снимает необходимости выбора наиболее эффективного способа утилизации ОЯТ, которое на длительный период времени остается высокоактивным материалом. Этот период (порядка 1000 лет и более) значительно превышает, например, проектный срок службы металлбетонных контейнеров (50 лет), а наземные хранилища ОЯТ представляют собой источник повышенной радиологической опасности для территории региона как при техногенных авариях, так и в случае террористических действий.

Перспектива обращения с проблемными видами ОЯТ до сих пор остается достаточно неопределенной. Так, например, для уран-циркониевого и уран-бериллиевого ОЯТ требуется создание технических и технологических средств переработки, в основном, на головных стадиях процесса. Значительная часть дефектного ОЯТ требует разработки специальных технологий по выгрузке ОТВС из хранилищ и последующей загрузки такого топлива в контейнеры.

Многофакторный характер проблемы обращения с проблемными видами ОЯТ обуславливает постановку вопроса о возможном долговременном хранении такого топлива, если его переработка окажется невозможной или нецелесообразной.

Для обеспечения современных требований экологической безопасности в области обращения с облученным топливом Горным институтом Кольского научного центра РАН был предложен вариант долговременного хранения проблемных видов ОЯТ в подземном хранилище, размещенном в геологических формациях региона (Мельников и др., 2003; 2006).

Научное обоснование предложенной концепции потребовало, в частности, изучения теплового режима хранилища ОЯТ как одного из наиболее важных факторов, определяющих выбор конструктивно-компоновочных решений такого объекта и эксплуатационные условия хранения облученного топлива.

Отработавшее ядерное топливо, как источник тепла, характеризуется мощностью остаточного энерговыделения (МОЭ), обусловленного радиоактивным распадом содержащихся в облученном топливе продуктов реакций деления и актинидов. При этом величина МОЭ определяется в основном такими факторами, как энерговыработка активных зон и продолжительность выдержки топлива после останова реактора. Для проблемных видов ОЯТ судовых ЯЭУ, накопленного в регионе, характерно большое разнообразие указанных параметров. Так, например, энерговыработка активных зон реакторов ЯЭУ различного типа варьирует от 3 до 97 ГВт·сут, а время выдержки ОЯТ – от ~6 до ~40 лет. Широкий диапазон изменения указанных параметров обуславливает и значительное разнообразие ОЯТ по величине МОЭ. На основе результатов расчетов изотопных составов активных зон различного типа (Мельников и др., 2003) определено, что суммарная МОЭ проблемных видов ОЯТ на 2010 год составляет примерно 29 кВт. При этом около 75 % этой величины определяется остаточным тепловыделением уран-циркониевого ОЯТ, что обусловлено его наиболее высокой энерговыработкой (от 38 до 97 ГВт·сут) и наименее продолжительной выдержкой. Наоборот, для уран-бериллиевого ОЯТ в среднем характерна наименьшая глубина выгорания (диапазон изменения глубины выгорания от 3 до 25 ГВт·сут), что обуславливает относительно малую величину МОЭ такого топлива.

В настоящей статье представлены основные положения разработанной методики и результаты расчетов температурного режима подземного хранилища ОЯТ контейнерного типа.

2. Методика расчета температурного режима контейнерного хранилища ОЯТ

Для расчетов температурного режима хранилища ОЯТ применена методика, основанная на численном решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности, которое связывает временное и пространственное изменение температуры и записывается в следующем виде:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + q_v.$$

Это уравнение может быть использовано для решения конкретных задач теплопроводности, если оно дополнено условиями однозначности, которые включают в себя:

- геометрические условия, задающие форму и размеры тела;
- физические условия, определяющие теплофизические свойства вещества (теплопроводность λ , удельную теплоемкость c и плотность ρ), а также изменение в пространстве и во времени удельной мощности внутренних источников тепла q_v ;
- начальные условия, устанавливающие распределение температуры внутри тела в начальный момент времени;
- граничные условия, характеризующие процесс теплообмена между поверхностью тела и окружающей его средой.

В качестве базового программного продукта, позволяющего реализовать численное решение уравнения теплопроводности в трехмерной постановке, использована верифицированная математическая программа FFM, разработанная сотрудником Горного института КНЦ РАН А.В. Наумовым. Для получения системы дискретных алгебраических аналогов уравнения теплопроводности в программе FFM используется метод Патанкара (Патанкар, 1984). Аппроксимация производной от температуры по времени, которая применяется в указанном методе, соответствует неявной схеме, что позволяет применять большие шаги по времени при расчете нестационарных процессов. Для решения системы алгебраических уравнений применяется метод прогонки в сочетании с методом Гаусса-Зейделя, а для ускорения сходимости итерационного процесса при решении нелинейного уравнения теплопроводности используется метод верхней релаксации.

В постановочном плане изучение теплового режима подземного хранилища ОЯТ сводится к расчету максимальной температуры горного массива и материалов в контейнерах, размещаемых с произвольным шагом в подземном модуле хранилища. Методика решения рассматриваемой задачи базируется на создании математической модели одиночного контейнера, которая характеризуется определенными геометрическими параметрами и физическими свойствами, а также граничными условиями, изменяющимися во времени в зависимости от теплового состояния окружающей его среды под тепловым воздействием системы контейнеров.

Говоря о геометрических параметрах модели, следует отметить, что в настоящее время разработаны и изготавливаются две модификации транспортно-упаковочных комплектов (ТУК) для ОЯТ транспортных ЯЭУ. Одна модификация (ТУК-108/1, см. рис. 1) предназначена для транспортирования и временного хранения ОЯТ атомных подводных лодок и надводных кораблей ВМФ с ядерными энергетическими установками, а вторая модификация (ТУК-120) – для ОЯТ судов атомного ледокольного флота России (Гуськов, 2006). Контейнеры ТУК-120, в частности, будут использованы для хранения уран-циркониевого топлива атомных ледоколов в наземном хранилище, которое введено в эксплуатацию в 2006 г. на территории ФГУП "Атомфлот" в Мурманске.

Контейнер ТУК-120 практически аналогичен контейнеру ТУК-108/1. Основное отличие состоит в том, что в каждом из контейнеров ТУК-120 будет храниться по 70 тепловыделяющих сборок, размещаемых в два яруса. В контейнерах ТУК-108/1 может размещаться до 49 ОТВС в один ярус.

Контейнер ТУК-108/1 (ТУК-120) представляет собой цилиндрическую конструкцию высотой около 4,6 м, состоящую из металлобетонного корпуса диаметром примерно 1,6 м и двух стальных герметизирующих крышек. Силовая часть металлоконструкции корпуса выполнена из двух концентрически расположенных цилиндрических стальных оболочек (внутренней толщиной 16 мм и силовой наружной толщиной 25 мм) с днищем. Полость между оболочками (толщина 270 мм) заполнена жестко армированным особо прочным бетоном класса D4100 по плотности. Армирование основного бетонного массива выполнено в виде наружной и внутренней решеток, связанных радиальными стержнями. Снаружи контейнера установлена экранирующая стальная оболочка (толщина 25 мм). Зазор между экранирующей и силовой оболочками (толщина 85 мм) заполнен бетоном класса D3700 по плотности.



Рис. 1. Контейнер ТУК-108/1

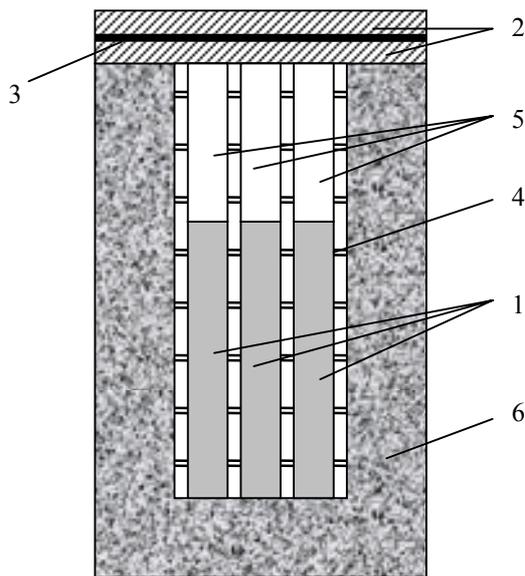


Рис. 2. Схематический вид металлобетонного контейнера для ОЯТ судовых ЯЭУ:

- 1 – зона чехлов, содержащая топливную часть ОТВС; 2 – стальные крышки; 3 – прокладка;
- 4 – стальные диафрагмы; 5 – зона чехлов без топливной части ОТВС; 6 – корпус контейнера.

Внутренняя полость контейнера, предназначенная для упорядоченного размещения семи чехлов с ОТВС, имеет размеры, аналогичные металлическому контейнеру ТУК-18: диаметр 775 мм и высота 3530 мм. Чехлы предназначены для упорядоченного размещения в них ОТВС в вертикальном положении. Чехол представляет собой сварную конструкцию высотой 3500 мм и диаметром примерно 240 мм, состоящую из трубного блока и пробки. Трубный блок состоит из 3, 5 или 7 труб (в зависимости от типа размещаемых сборок) с толщиной стенки 3 мм, вваренных в корпус и нижнюю решетку, к которой приварено днище.

Конструкция контейнера данного типа может быть представлена в схематическом виде, приведенном на рис. 2.

Особенности конструкции контейнера, которые обусловлены наличием разных материалов и множества внутренних полостей различной конфигурации, определяют сложный характер теплопередачи в контейнере за счет различных механизмов переноса теплоты (теплопроводность, конвекция, тепловое излучение). В этих условиях детальный расчет распределения температуры в каждом из элементов контейнера затруднен, поэтому для проведения расчетов теплового режима контейнера был разработан методический

подход, основанный на замене реальных гетерогенных структур в контейнере гомогенными зонами и определении эффективных теплофизических свойств таких зон.

Для оценки таких структурно-нечувствительных скалярных параметров X как эффективная плотность и удельная теплоемкость гомогенизированных зон используется формула арифметического средневзвешенного соответствующих параметров X_i элементов гетерогенных структур с относительным объемным содержанием V_i :

$$X = \Sigma(X_i V_i). \quad (1)$$

Такой тензорный параметр как коэффициент теплопроводности зависит не только от соответствующих параметров структурных элементов, но и в значительной степени от направления приложения теплового поля. Поэтому сложная конструкция контейнера обуславливает необходимость применения ряда методических подходов для оценки эффективного коэффициента теплопроводности гомогенизированных зон с учетом анизотропии тепловой проводимости среды в осевом и радиальном направлениях, характерной для конструктивного исполнения контейнера.

В осевом (вертикальном) направлении передача тепла внутри контейнера осуществляется, в основном, вдоль структуры, состоящей из включений в виде чехлов и воздушных прослоек. В определенном отношении данная структура аналогична горной породе, сложенной из слоев с различными коэффициентами теплопроводности λ_i с относительным объемным содержанием V_i . Поэтому, по аналогии со структурно-неоднородными горными породами, эффективный коэффициент теплопроводности в осевом направлении определяется как арифметическое средневзвешенное коэффициентов теплопроводности включений с использованием формулы (1). При этом эффективная теплопроводность воздушных прослоек между диафрагмами (перегородками), расположенными по высоте свободного пространства между чехлами, определяется с учетом вклада таких механизмов передачи тепла, как свободная конвекция и теплообмен излучением.

Для расчета эффективной теплопроводности в радиальном направлении было использовано модельное представление, основанное на разбиении внутреннего пространства контейнера на четыре коаксиальные кольцевые зоны. Первая зона включает центральный чехол, размещенный в центральной трубе выемной части контейнера, вторая – воздушную прослойку между центральным чехлом и шестью периферийными чехлами, третья – шесть периферийных чехлов, четвертая – воздушную прослойку между периферийными чехлами и металлобетонной защитой контейнера.

Такая схематизация, тем не менее, не устраняет необходимости расчета эффективной теплопроводности в каждой из выделенных кольцевых зон. Так, например, зоны чехлов, содержащие ОТВС, представляют собой гетерогенные структуры, включающие в себя все конструктивные элементы тепловыделяющих сборок и чехла. Для расчета эффективной теплопроводности чехлов была использована методика, приведенная в работе (Снегирев и др., 1997). В соответствии с этой методикой, структурные элементы чехлов рассматриваются как совокупность изолированных включений в сплошной среде. Для вычисления эффективной теплопроводности в такой системе используется формула Оделевского:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_0 \{ 1 - m [1 / (1 - \lambda_1 / \lambda_0) - (1 - m) / 3]^{-1} \}, \quad (2)$$

где λ_0 , λ_1 – коэффициенты теплопроводности материалов сплошной среды и изолированных включений, соответственно; m – "концентрация" (относительное объемное содержание) включений.

С использованием формулы (2) проводятся последовательные расчеты структурных элементов с учетом их конструктивных особенностей и материального состава.

Как и в случае осевого направления, эффективная теплопроводность воздушных прослоек определяется как результат совместного действия свободной конвекции и лучистого теплообмена с учетом теплопроводности через стальные диафрагмы, расположенные вдоль направления теплового потока.

В наибольшей степени специфику решения уравнения нестационарной теплопроводности применительно к оценке теплового режима подземного хранилища ОЯТ отражают граничные условия. Для определения этих условий разработана методика, которая позволяет оценить изменяющуюся во времени интенсивность граничного теплообмена с учетом изменения теплового состояния окружающей среды под совокупным воздействием контейнеров, размещаемых в подземной выработке на произвольном расстоянии друг от друга.

На верхней границе расчетной области одиночного контейнера (поверхность наружной крышки контейнера) устанавливается граничное условие второго рода, соответствующее теплоотдаче при естественной конвекции в большом объеме и теплообмену излучением между крышкой контейнера и контуром выработки в свободном пространстве подземного модуля.

На боковой поверхности контейнера рассматривается граничное условие второго рода, которое в общем случае характеризует смешанный теплообмен излучением поверхности контейнера с "видимой" поверхностью контура подземной выработки и конвективный теплообмен с воздухом в канале, образованном соседними контейнерами.

Для определения лучистой составляющей теплообмена используется модель ячейки хранилища, состоящей из центрального (рассматриваемого) контейнера и окружающих его соседних (периферийных) контейнеров. Геометрические параметры просветов между контейнерами определяют характеристику пространственного распределения излучения боковой поверхности центрального контейнера по направлению к поверхности свода выработки, которая в модельном представлении рассматривается как горизонтальная пластина. При таком модельном представлении и заданных размерах контейнеров и высоте выработки параметры лучистого теплообмена зависят только от шага размещения контейнеров.

Интенсивность конвективного теплообмена в значительной степени зависит от инженерно-технических решений по системе вентиляции и, в частности, от способа подачи воздуха в подземный модуль хранения ОЯТ. В принципе возможны различные способы, но мы остановимся на двух, при использовании которых априори можно предполагать наиболее значительные различия в интенсивности теплоотдачи на боковых поверхностях контейнеров:

- подача воздуха в верхнюю часть модуля над контейнерами;
- подвод воздуха в нижнюю часть зоны хранения контейнеров.

Для условий подачи воздуха в верхнюю часть выработки тепловая задача решается в консервативном приближении с учетом только радиационного теплообмена боковой поверхности контейнера с "видимой" поверхностью свода выработки.

Для второго варианта (подвод воздуха в нижнюю часть зоны хранения контейнеров) поставленная тепловая задача решается в предположении о подводе воздуха снизу в каналы между контейнерами. Средний расход и скорость воздуха в каналах определяется заданной кратностью воздухообмена в подземной выработке и шагом размещения контейнеров. Для определения параметров конвективного теплообмена на боковой поверхности контейнера, обусловленного совместным действием вынужденного течения и термогравитационной конвекции, используется методика, в соответствии с которой при $Ra/x > 1,5 \cdot 10^4$ коэффициент теплоотдачи при смешанной конвекции определяется по следующей формуле (Кутателадзе, 1990):

$$\alpha/\alpha_o \approx 0,17(Ra/x)^{0,18},$$

где α_o – коэффициент теплоотдачи при ламинарном режиме вынужденного течения, определяемый из критерия $Nu_o = \alpha_o D_T / \lambda$; $Ra = (g D_T \beta \Delta T) Pr / \nu^2$ – число Рэлея (β – коэффициент объемного расширения воздуха; ν – кинематическая вязкость; ΔT – температурный перепад между боковой поверхностью контейнера и воздухом в канале); Pr – число Прандтля; $D_T = d_k [4(s/d_k)^2 / \pi - 1]$ – в рассматриваемой задаче гидравлический диаметр квадратной решетки цилиндрических стержней (контейнеров) диаметром d_k при шаге размещения контейнеров $s = d_k + \delta$ (δ – расстояние между контейнерами); λ – теплопроводность воздуха; $x = H_k / D_T$ (H_k – высота канала (контейнера)).

При заданном диаметре контейнера d_k величина числа Nu_o при ламинарном течении зависит только от шага размещения контейнеров.

Определенные таким образом граничные условия, характеризующие процесс теплообмена между поверхностью контейнера и окружающей его средой, в сочетании с геометрическими и физическими параметрами математической модели позволяют выполнить расчеты нестационарного теплового состояния контейнера в условиях подземного хранилища ОЯТ.

3. Результаты расчетов теплового режима хранилища ОЯТ

В соответствии с принятой методикой расчета теплового режима хранилища ОЯТ в качестве объекта исследования рассматривается одиночный контейнер типа ТУК-120, в котором размещены 7 чехлов с помещенными в них 70 ОТВС с уран-циркониевой топливной композицией. Принято, что эти ОТВС выгружены из активных зон, которые характеризуются энерговыработкой 97 ГВт·сут.

В качестве критериев приемлемости температурных режимов рассматриваются следующие требования к характеристикам теплового состояния материалов:

- температура любой наружной легкодоступной поверхности при условиях нормальной эксплуатации не должна превышать 85°C (Правила безопасной перевозки..., 1985);
- максимальная температура горной породы не должна превышать 100°C . При таком ограничении температуры влияние теплового фактора на механические свойства кристаллических скальных пород типа гранита незначительно, и практически исключается парообразование (Ржевский, Новик, 1984; Сорокин и др., 1989).

Говоря об интенсивности источника тепла в контейнере, отметим, что в работе рассматривались два периода времени. В первом варианте принималось заполнение подземного хранилища контейнерами в 2010 г. Хотя в настоящее время введено в эксплуатацию наземное хранилище контейнеров ТУК-120, рассмотрение указанного периода времени представляет определенный научный интерес. К этому

времени рассматриваемое ОЯТ характеризуется еще относительно высокой интенсивностью остаточных тепловыделений, что позволяет более контрастно изучить влияние теплового фактора на конструктивно-компоновочные параметры подземного хранилища.

При принятой компоновке ОТВС в контейнере и средней выдержке ОЯТ 10 лет интенсивность источника тепла характеризуется суммарной мощностью остаточного энерговыделения, равной примерно 840 Вт. Основные результаты расчетных исследований для этого варианта приведены на рис. 3, который иллюстрирует динамику максимальной температуры поверхности контейнера при различных условиях теплообмена на боковой поверхности контейнера и разном расстоянии между контейнерами. Из приведенных данных видно, что в условиях отсутствия конвективного теплообмена при подаче воздуха в верхнюю часть выработки уменьшение плотности размещения контейнеров (кривые 1 и 2) способствует снижению максимальной температуры поверхности рассматриваемого контейнера. Вместе с тем, даже при довольно значительном расстоянии между контейнерами (0,7 м) прогнозируемый уровень максимальной температуры поверхности контейнера не отвечает нормативным требованиям (85°C).

Кривые 2 и 3 на рис. 3 иллюстрируют влияние способа подвода воздуха в подземную выработку. При подаче воздуха в выработку снизу контейнеров, когда отвод тепла с боковой поверхности контейнера осуществляется за счет лучистого теплообмена и совместного действия вынужденного и термогравитационного течений воздуха, приемлемый уровень температуры поверхности контейнера может быть достигнут при расстоянии между контейнерами 0,3 м (кривая 3). В этом случае температурный режим хранилища отвечает и другому критерию – максимальная температура горной породы в основании выработки не превышает 80°C.

Таким образом, результаты выполненных расчетов позволяют сделать вывод, что при рассматриваемом гипотетическом варианте строительства и заполнения подземного хранилища контейнеров с ОЯТ в 2010 г. тепловой фактор мог бы оказать существенное влияние на выбор конструктивно-компоновочной схемы подземного хранилища.

Второй рассмотренный вариант предполагает вероятное развитие ситуации, которая может сложиться в случае отсутствия решения о переработке проблемных видов ОЯТ через 50 лет хранения (к 2057 г.) Очевидно, что к этому времени практически все неперерабатываемое ОЯТ становится "холодным" в результате снижения активности основных теплогенерирующих радионуклидов в составе облученного топлива. В этом случае суммарная величина МОЭ всех ОТВС, размещенных в контейнере, составляет примерно 270 Вт.

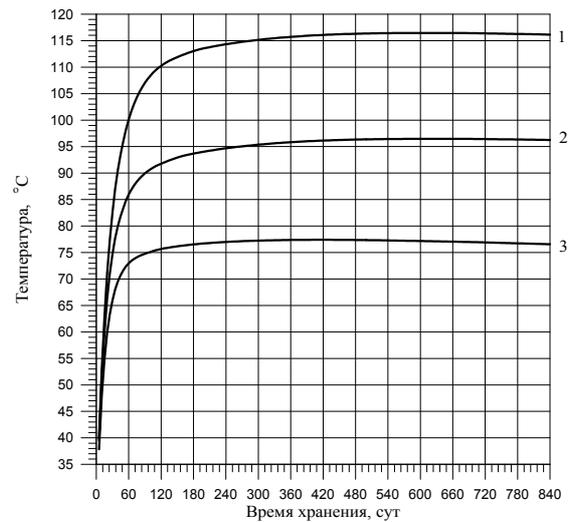


Рис. 3. Динамика изменения максимальной температуры поверхности контейнера с ОЯТ (выдержка 10 лет) при различных условиях теплообмена на боковой поверхности контейнера и расстоянии между контейнерами:

- 1 – отсутствие конвекции на боковой поверхности (расстояние между контейнерами 0,3 м);
- 2 – отсутствие конвекции на боковой поверхности (расстояние между контейнерами 0,7 м);
- 3 – наличие конвекции на боковой поверхности (расстояние между контейнерами 0,3 м)

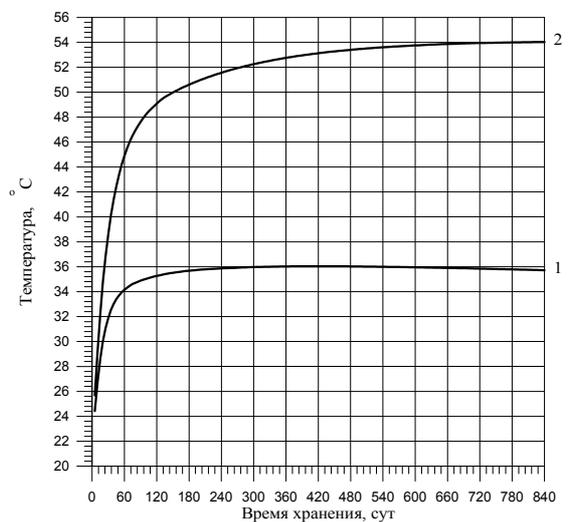


Рис. 4. Динамика изменения максимальной температуры поверхности контейнера с ОЯТ (выдержка 57 лет, расстояние между контейнерами 0,3 м) при наличии (1) и отсутствии (2) конвекции на боковой поверхности контейнера

Для иллюстрации влияния рассматриваемых способов подачи воздуха в подземную выработку на тепловое состояние элементов контейнера на рис. 4 приведены результаты расчетов максимальной температуры поверхности контейнера при минимальном расстоянии между контейнерами, равном 0,3 м. Как видно из рис. 4, в обоих случаях тепловое состояние поверхности контейнера характеризуется умеренным уровнем температур (35-56°C), которые значительно ниже нормативных требований. Примерно такой же уровень максимальной температуры характерен и для горной породы в основании выработки.

Таким образом, результаты расчетных исследований температурного режима элементов системы подземного хранилища контейнеров с ОЯТ позволяют сделать вывод, что через 50 лет хранения проблемного ОЯТ в контейнерах (как это предусматривается современной концепцией обращения с таким топливом в регионе) остаточные тепловыделения топлива оказывают умеренное тепловое воздействие на материалы в системе подземного хранилища проблемных видов ОЯТ.

4. Заключение

В рамках исследования тепловой безопасности подземного хранилища проблемных видов ОЯТ судовых ЯЭУ разработана методика расчета температурного режима хранилища в варианте сухого контейнерного хранения облученного топлива. Методика основана на реализации численного решения уравнения нестационарной теплопроводности для математической модели одиночного металлобетонного контейнера типа ТУК-120 или ТУК-108/1. Одним из основных элементов модели является эффективная теплопроводность среды во внутренней полости контейнера. Для количественной оценки этого параметра разработан методический подход, основанный на замене реальных гетерогенных структур гомогенными зонами и определении эффективной теплопроводности таких зон как результат совместного действия элементарных процессов теплопередачи (теплопроводность, конвекция, тепловое излучение) с учетом гетерогенной структуры материалов.

Результаты теплофизических расчетов, выполненные с использованием разработанной методики, позволили сделать вывод, что при возможном размещении контейнеров с проблемными видами ОЯТ судовых ЯЭУ в подземном хранилище через 50 лет хранения топлива в наземных хранилищах прогнозируемый уровень температуры поверхности контейнеров и горной породы не превышает 60°C.

Литература

- Гуськов В.Д. Создание металлобетонных контейнеров для ОЯТ ядерных энергетических установок. *По мат. междунар. конф. "Стратегия безопасности использования атомной энергии", 25-29 сентября 2006, Санкт-Петербург. www.proatom.ru/modules.php?nam=News&file = article&sid=767.*
- Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие. М., Энергоатомиздат, 367 с., 1990.
- 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 I и Часть II. *Апатиты, КНЦ РАН*, 166 с., 209 с., 2003.
- Мельников Н.Н., Конухин В.П., Наумов В.А., Амосов П.В., Гусак С.А., Наумов А.В., Катков Ю.Р., Смирнов Ю.Г., Орлов А.О., Рыбин Ю.Ю. Концепция подземного хранилища отработавшего ядерного топлива судовых ядерных энергетических установок на Кольском полуострове. *Вестник МГТУ*, т.9, № 3, с.408-418, 2006.
- Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М., Энергоатомиздат, 150 с., 1984.
- Правила безопасной перевозки радиоактивных веществ. *Серия изданий МАГАТЭ по безопасности № 6. Вена, МАГАТЭ*, 112 с., 1985.
- Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. М., Недра, 359 с., 1984.
- Снегирев А.Ю., Федорович Е.Д., Талалов В.А., Степанов В.В. Моделирование процессов переносов тепла в водозаполненных контейнерах для хранения отработавшего топлива АЭС. *Вопросы материаловедения*, вып. 6(12), с.38-47, 1997.
- Сорокин В.Т., Козлов А.Е., Пучков О.К., Никольский М.А., Федоров А.Л., Дорожкин А.Н. Теплотехнические аспекты захоронения отвержденных радиоактивных отходов в геологических формациях. *Препринт ВНИПИЭТ, инв. №89-05353. Л., ВНИПИЭТ*, 42 с., 1989.
- Шишкин В.А. Основные результаты стратегических исследований по обращению с неперерабатываемым и дефектным ОЯТ в Северо-западном регионе России. *Доклад на семинаре NDEP-NOC / КЭГ по СМП-II. 12 апреля 2007, Лондон, Великобритания. www.iaea.org/OurWork.*