

УДК 621.039.588

И.И. Свириденко, доцент, канд. техн. наук,

А.А. Погрей, студент

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053

E-mail: i.sviridenko@mail.ru

Н.Н. Свириденко, науч. сотрудник

Международный инженеринговый центр передовых технологий

ул. Н. Островской, 14А, г. Севастополь, 299028

E-mail: nn.sviridenko@mail.ru

СИСТЕМА ПАССИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ НА СУДНЕ

Рассмотрена функциональная схема контейнера для транспортировки на судне отработавшего ядерного топлива, а также судовая система теплоотвода от контейнера к забортной воде. Предложена термосифонная система пассивного отвода остаточного тепловыделения отработавшего ядерного топлива.

Ключевые слова: *отработавшее ядерное топливо, пассивный отвод остаточного тепловыделения, термосифон, транспортировка, контейнер, судно, безопасность.*

Развитие атомной энергетики и строительство новых энергоблоков атомных электростанций (АЭС) в России и других странах связано с расширением системы транспортировки ядерного топлива. Планируемое «Росатомом» в ближайшее время строительство новых энергоблоков в таких странах как Бангладеш, Вьетнам, Индия, Иран, Иордания, Китай, Турция, Южно-Африканская Республика, а также возможное строительство в Аргентине приведет к необходимости создания флота специализированных судов для транспортировки ядерного топлива морем.

Отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) со всех зарубежных ядерных объектов, построенных СССР и Россией, возвращается в Россию. Поэтому организация его транспортировки из стран, не имеющих прямого сухопутного сообщения с российскими предприятиями переработки или длительного хранения ОЯТ, потребует создания специальных судов.

Существует три основные задачи, которые решаются при перевозке ОЯТ с АЭС [1]:

- обеспечение радиационной безопасности персонала и населения, в том числе при аварийных ситуациях;
- исключение перегрева ОЯТ во время транспортировки;
- физическая защита ОЯТ от возможных терактов и попыток хищения делящихся материалов злоумышленниками.

Целью статьи является решение задачи по недопущению перегрева ОЯТ во время его транспортировки морем с учетом действующих международных и российских требований, предъявляемых к перевозке ОЯТ на судах.

Специфика перевозки ОЯТ на судах заключается в том, что решение указанных задач должно обеспечиваться обязательным выполнением особых требований, сформулированных двумя влиятельными международными организациями: Международной морской организации (ИМО) и Международным агентством по атомной энергии (ИАЕА). Международное агентство по атомной энергии, как организация, осуществляющая контроль за использованием атомной энергии, разработала международную нормативную базу по транспортировке ОЯТ. Российские Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов (НП-053-04) основываются на стандартах ИАЕА и соответствуют их требованиям.

Наиболее сложной является задача исключения перегрева ОЯТ во время его транспортировки. Извлеченное из реактора ОЯТ имеет значительное остаточное энерговыделение, являющееся следствием бета- и гамма-распада продуктов деления, которые накопились в топливной матрице за время работы тепловыделяющей сборки в реакторе, а также альфа- и бета-распада актиноидов. Требованиями к перевозке радиоактивных материалов на судах морского и речного флота [2] предусмотрены ограничения по их размещению, обусловленные тепловыделением каждой упаковки с ОЯТ, причем эти ограничения не связаны с программой радиационной защиты. Выполняется оценка отвода теплоты естественным путем, а также за счет механических средств и, если необходимо, определяются тепловыделение от каждой упаковки.

Для перевозки ОЯТ АЭС с ВВЭР-440/1000 в настоящее время используются стандартные транспортные контейнеры ТК-6, ТК-10, ТК-13, не имеющие специальных систем или устройств отвода остаточного тепловыделения. После извлечения отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) из

реактора время их предварительной выдержки в приреакторных бассейнах до отправки со станции составляет от 3 до 5 лет, при условии работы блока в условиях ранее применявшегося трехлетнего топливного цикла с относительно небольшой глубиной выгорания топлива. Указанного времени достаточно для снижения уровня радиационной активности и остаточного тепловыделения отработавшего топлива до безопасных значений. Однако столь длительные сроки выдержки ОЯТ перед его вывозом приводят к необходимости наличия приреакторных бассейнов выдержки (БВ) большой вместимости, что в свою очередь, ведет к росту объемов реакторных отделений АЭС с соответствующим расширением границ системы герметичных ограждений, увеличением толщины гермооболочки и защитной оболочки реакторного отделения.

В последнее время на некоторых АЭС по экономическим соображениям (из-за высокой стоимости услуг предприятий переработки и хранения) отправке на специализированные комбинаты длительного хранения ОЯТ предпочитают организацию его сухого хранения на промплощадках своих станций, что увеличивает в среднем на год время выдержки ОЯТ в приреакторных бассейнах. Соответственно, увеличивается количество ОЯТ, находящегося на временной выдержке в БВ таких станций.

Следовательно, возникает необходимость вывоза с АЭС и транспортировки ОЯТ с более высоким энерговыделением, нежели допускает конструкция существующих топливных контейнеров. Поэтому актуальной становится задача разработки транспортных контейнеров с эффективным теплоотводом от ОЯТ, при этом эффективность теплопереноса в контейнере с учетом возможной транспортировки морем, железнодорожным или автомобильным транспортом не должна зависеть от его пространственного расположения (вертикального, горизонтального, наклонного).

Таковыми свойствами могут обладать контейнеры, оборудованные системами пассивного теплоотвода, например, на основе применения испарительно-конденсационных устройств замкнутого типа – двухфазных термосифонов (ДТС). ДТС обеспечивают эффективный отвод теплоты от источника тепловыделений к конечному поглотителю за счет испарения своего промежуточного теплоносителя в зоне подвода теплоты и конденсации – в зоне отвода, с возвратом конденсата в зону теплоподвода за счет массовых сил. Контейнеры с такой пассивной системой теплоотвода позволят производить выгрузку из БВ, хранение и транспортировку ОЯТ на значительные расстояния со сравнительно малым сроком выдержки (1...3 года после выгрузки из активной зоны реактора).

Помимо основного преимущества – организации теплоотвода от ОТВС при естественной циркуляции теплообменивающихся сред, контейнер с подобной системой будет обладать дополнительным физическим барьером на пути возможного выхода радионуклидов из ОЯТ в окружающую среду. Первым барьером будет граница (стенка) между ОЯТ и внутренним объемом ДТС, вторым – граница (стенка) между внутренним объемом ДТС и окружающей средой. Это обеспечит дополнительную радиационную безопасность при случайных внешних механических воздействиях на контейнер, например, при его падении или опрокидывании.

На рисунке 1 изображена схема предлагаемого контейнера с пассивной системой отвода остаточного тепловыделения перевозимого ОЯТ. Пассивная система теплоотвода позволяет эффективно отводить накапливаемую в контейнере теплоту продуктов распада в окружающее воздушное пространство.

Наружная (защитная) оболочка контейнера, предназначенного для транспортировки, выполняется стальной, для контейнера длительного хранения ОЯТ – железобетонной.

ОТВС размещаются в индивидуальных ячейках внутренней герметичной корзины контейнера. Внутренний объем корзины заполняется жидким теплоносителем. Тепловой поток от ОТВС передается жидкому теплоносителю. Отвод остаточного тепловыделения во время длительного хранения ОЯТ обеспечивается при естественной циркуляции теплоносителя, омывающего ОТВС (рисунок 2). Поднимаясь в верхнюю часть корзины между установленными в ней ОТВС, теплоноситель воспринимает выделяющуюся в ОЯТ теплоту и переносит ее к стенкам корзины. Опускаясь вдоль стенок корзины вниз, теплоноситель отдает теплоту последним и возвращается к ОТВС.

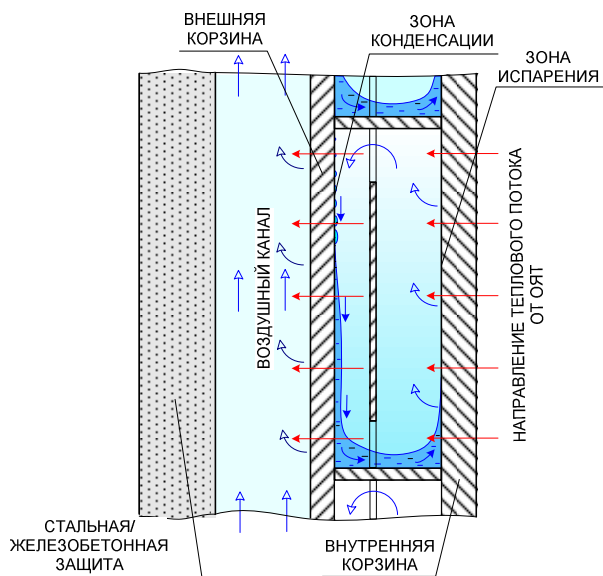


Рисунок 1 – Термосифонная система пассивного отвода остаточного тепловыделения ОЯТ

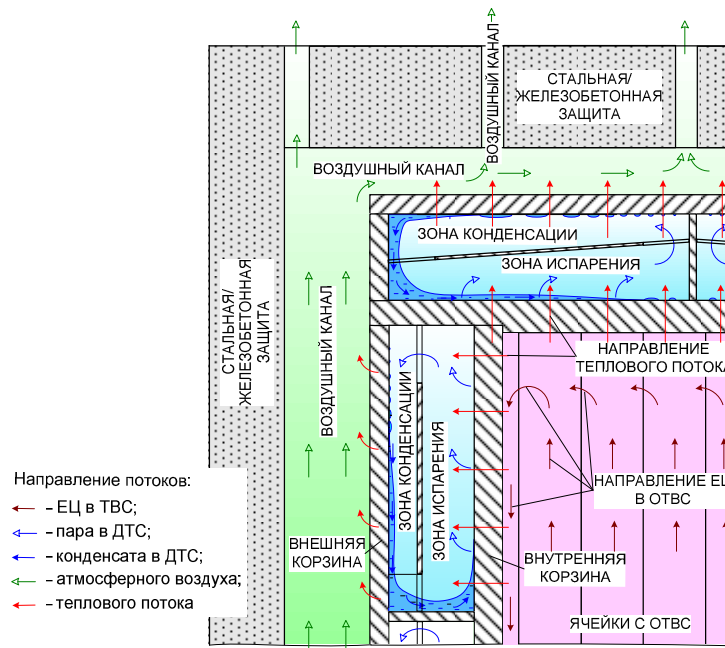


Рисунок 2 – Схема тепловых потоков в контейнере с ОЯТ

Боковые и торцевые стенки контейнера представляют собой сотовую конструкцию, состоящую из отдельных замкнутых объемов – автономных ДТС. Внутренние стенки герметичной корзины выполняют функции испарительных участков ДТС. В каждом из ДТС имеется вставка, обеспечивающая разделение потоков пара и конденсата. Причем, в ДТС боковой стенки корзины вставки расположены вертикально, в ДТС торцевых крышек – наклонно. Разделительные вставки в боковых ДТС крепятся к верхней и к нижней поверхности каждого ДТС. В верхней и нижней части вставка имеет отверстия для эвакуации пара и возврата конденсата, соответственно. Вставки в ДТС торцевых крышек корзины крепятся к боковым поверхностям ДТС и имеют соответствующие отверстия для циркуляции пара и конденсата, расположенные в центральной и периферийной зонах крышки.

Внутренняя стенка внешней корзины контейнера является для боковых ДТС зоной конденсации теплоносителя. По этой стенке стекающая пленка конденсата возвращается в зону испарения. Для торцевых ДТС поверхностью конденсации является верхняя стенка термосифонов. Теплоотвод от наружной поверхности зоны конденсации ДТС обеспечивается за счет естественной конвекции воздуха, проходящего через зазор между наружной поверхностью ДТС и внутренней поверхностью защитной оболочки. При разгерметизации одного или нескольких ДТС система теплоотвода не теряет своей работоспособности, так как оставшиеся ДТС возьмут на себя тепловую нагрузку.

Размер отверстий для прохода пара и конденсата теплоносителя ДТС на цилиндрических вставках коаксиальных элементов одинаков. Это обеспечивает сохранение эффективности работы термосифонной системы теплоотвода при перевернутом/опрокинутом на бок положении контейнера (например, из-за опрокидывания контейнера при проведении транспортно-технологических операций, либо при перевороте всего судна вверх килем). Таким образом, конструкция контейнера с ДТС обеспечит надежный теплоотвод от корзины с ОТВС при любом его стационарном или транспортном положении.

ОТВС размещаются в многосекционной герметичной внутренней корзине. Внутренняя корзина заполнена теплоносителем. В качестве теплоносителя предлагается использовать низкокипящие жидкости – антифризы, обеспечивающих надежный теплоотвод при любых плотностях теплового потока, вплоть до минимальных. Сравнительно низкая температура замерзания антифриза обеспечит работоспособность системы, даже в условиях отрицательных температур. Кроме того, антифриз полностью совместим с нержавеющей сталью, что обеспечит надежное и безопасное функционирование корзины контейнера.

Для обеспечения работы пассивной системы теплоотвода контейнера на судне предлагается пассивная система теплоотвода от контейнера к забортной воде (рисунок 3). В основу ее функционирования положен принцип действия кольцевого конвективного термосифона (КТС).

КТС представляет собой набор вертикальных каналов (внутренних и внешних), формирующих объем двойного борта судна. Внутренние каналы КТС осуществляют теплоотвод от воздуха, циркулирующего в отсеке и охлаждающего контейнер, наружные каналы обеспечивают теплоотвод к забортной воде через бортовую обшивку корпуса судна.

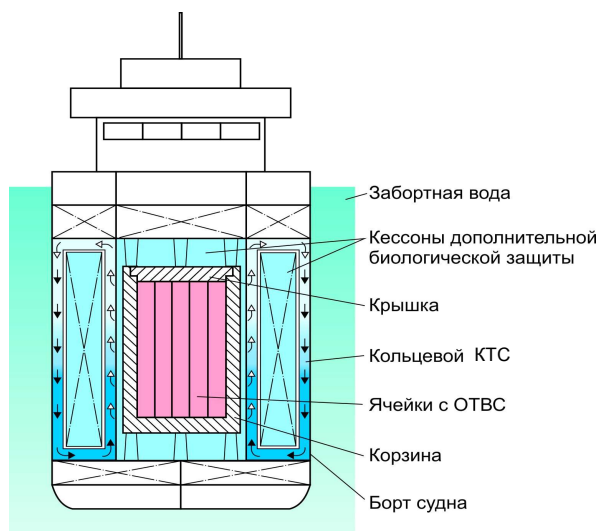


Рисунок 3 – Система пассивного теплоотвода от контейнера с ОЯТ к заборной воде

любой ориентации контейнера в пространстве, повысить безопасность при вывозе с АЭС, особенно при транспортировке морем. Контейнер с предложенной термосифонной оболочкой будет обладать дополнительным физическим барьером на пути возможного выхода радионуклидов из ОЯТ в окружающую среду.

Оценка характеристик контейнера с пассивной системой теплоотвода на основе ДТС требует создания полной расчетной модели и изготовления макета для определения удельных характеристик системы с последующей проверкой результатов на экспериментальном образце, что является задачей дальнейшего исследования.

Библиографический список использованной литературы

1. Безопасная опасность [Электронный ресурс] // Вокруг света. — 2003. — № 7 (2754). — Режим доступа: <http://www.vokrugsveta.ru/vs/article/521/> Saturday, 17 May 2014 10:40:17.
2. РБ-039-07. Руководства по безопасности. Обеспечение безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. (Справочный материал к Правилам безопасности при транспортировании радиоактивных материалов, НП-053-04). Введ. 2007–12–03. — М.: Федер. служ. по экол., технол. и атомн. надзору, 2007. — 247 с.

Поступила в редакцию 13.10.2014 г.

Свириденко І.І., Погрій О.А., Свириденко Н.М. Система пасивного охолодження відпрацьованого ядерного палива під час транспортування на судні

Розглянута функціональна схема контейнера для транспортування на судні відпрацьованого ядерного палива, а також суднова система тепловідводу від контейнера до заборної води. Запропонована термосифонна система пасивного відводу залишкового тепловиділення відпрацьованого ядерного палива.

Ключові слова: відпрацьоване ядерне паливо, пасивний відвід залишкового тепловиділення, термосифон, транспортування, контейнер, судно, безпека.

Sviridenko I.I., Pogrey A.A., Sviridenko N.N. Passive cooling system of spent nuclear fuel during sea transportation

The function chart of the container for transportation on the vessel of spent nuclear fuel, and also ship system of the heat sink from the container to outside water is considered. The thermosiphon system of passive branch of a residual thermal emission of spent nuclear fuel is offered.

Keywords: spent nuclear fuel, passive residual heat removal, thermosiphon, transportation, container, vessel, safety.