

УДК 621.039.59:656

Проблемы транспортирования отработавшего ядерного горючего атомных электростанций

АРХИПОВСКИЙ Ю. И., БУРЛАКОВ В. А., КОНДРАТЬЕВ А. Н., ЛЮБИМОВ Е. Д., МАРКОВИН А. П.

Намеченные высокие темпы роста ядерной энергетики во всех странах мира требуют перевозок значительных количеств облученного ядерного горючего с АЭС на заводы регенерации. Специфика отработавшего горючего как предмета транспортирования заключается в высокой радиоактивности, значительном остаточном тепловыделении, наличии делящихся веществ, высокой стоимости и необходимости предотвращения последствий возможных аварий на транспорте.

Отработавшее горючее АЭС перевозится железнодорожным, автомобильным и водным транспортом в специально изготовленных транспортных контейнерах. Загруженные контейнеры имеют массу от 30 до 110 т, при этом на долю горючего приходится всего лишь 2—5%, а масса транспортного средства примерно равна массе контейнера. Время нахождения транспорт-

ных средств в пути с грузом за вычетом времени обратного рейса, загрузки, выхода на стабильный режим, разгрузки, отмывки, осмотра, ремонта и т. п. составляет лишь 10—20%. Можно представить, насколько дорого обходится перевозка отработавшего ядерного горючего.

Проблема транспортирования является важным звеном топливного цикла и требует творческого участия ученых, проектировщиков и конструкторов различных областей науки и техники для успешной разработки безопасных и экономичных конструкций контейнеров; выбора наиболее экономичного вида транспорта; решения вопросов юридического и организационного характера.

Рост единичной мощности реакторов ведет, как правило, к увеличению размеров и массы отработавших сборок, энергонапряженности и

Некоторые характеристики горючего советских водо-водяных энергетических реакторов и АЭС «Рейнсберг» (ГДР) [1, 2]

Таблица 1

Реактор	Электрическая мощность, МВт	Загрузка горючего UO ₂ , т	Глубина выгорания (средняя/максимальная), ГВт·сут/т	Числоборок в реакторе	Размеры сборки, SxL*, мм	Удельная γ-активность, г-экв Ra на сборку				Остаточное тепловыделение сборки после выдержки, кВт на сборку			
						Выдержка, год				Выдержка, год			
						0,5	1	2	3	0,5	1	2	3
АЭС «Рейнсберг»	70	18	10	132	144.3200	3,4·10 ⁴	9,7·10 ³	4·10 ³	3,2·10 ³	1,1	0,6	0,3	0,2
ВВЭР-210	210	44	13/19	349/37**	144.3200	3,7·10 ⁴	1·10 ⁴	4,4·10 ³	3,5·10 ³	1,2	0,7	0,3	0,2
ВВЭР-365	365	44	28/41	349/73	144.3200	6,4·10 ⁴	1,8·10 ⁴	7,5·10 ³	6·10 ³	2,1	1,1	0,5	0,3
ВВЭР-440	440	44	28/42	349/73	144.3200	6,7·10 ⁴	1,9·10 ⁴	7,9·10 ³	6,3·10 ³	2,2	1,2	0,6	0,3
ВВЭР-1000	1000	72	41/44	151	238.4665	3,4·10 ⁵	9,6·10 ⁴	4·10 ⁴	3,2·10 ⁴	11,1	6,0	2,8	1,7

* S — размер «под ключ»; L — длина сборки.

** В числителе — общее число всехборок в реакторе, шт.; в знаменателе — число регулирующихборок из общего числа.

содержания делящихся веществ в них. Сокращение времени топливного цикла требует, с другой стороны, перевозок горючего с малым временем выдержки, а следовательно, с еще большими остаточными тепловыделениями и активностью (табл. 1). Все это усложняет решение вопросов, связанных с транспортированием.

Разработка безопасной и экономичной конструкции контейнера

Упаковка отработавшего ядерного горючего — наиболее сложная часть транспортирования. Транспортные контейнеры для перевозки отработавшего горючего должны иметь надежную биологическую защиту от проникающих излучений (γ , n); быть герметичными, т. е. исключать возможность выхода радиоактивных продуктов в окружающую среду выше допустимых норм; обеспечивать достаточный теплоотвод для предотвращения расплавления твэлов или самовозгорания оболочек и горючего и в случае необходимости удаление или сжигание водорода, образующегося в результате радиолитического распада воды; отвечать требованиям ядерной безопасности в нормальных и аварийных условиях [3—5].

Правила безопасной перевозки радиоактивных веществ МАГАТЭ и разрабатываемые на их основе правила перевозки в отдельных странах [6, 7] предъявляют к конструкции транспортного контейнера высокие требования по обеспечению безопасности в аварийных условиях.

Для подтверждения соответствия нормам по герметичности и защите от ионизирующих излучений необходимо проведение испытаний, имитирующих максимальную предвидимую аварию: падение с высоты 9 м на стальную плиту; падение любой точкой с высоты 1 м на сплошной металлический стержень диаметром 0,15 м; нахождение в пламени (800°C) в течение 30 мин без последующего принудительного охлаждения в течение трех часов; погружение в воду на глубину не менее 15 м в течение восьми часов.

Биологическая защита

Для защиты от γ -излучения в качестве материалов при изготовлении контейнеров применяют сталь, свинец и обедненный уран. Свинец и уран дополнительно заключают в оболочку из стали. В СССР преимущественно используют сталь, в США и Франции изготовлено несколько контейнеров с защитой из свинца и урана [8, 9].

Требуемые толщины защиты из урана, свинца и стали относятся как 1 : 1, 8 : 3,1, несколько изменяясь в зависимости от степени облучения горючего. Этим обусловлены различия массы контейнера при заданном объеме внутренней полости или объема внутренней полости при заданной общей массе.

Использование свинцовой защиты при увеличении полезного объема контейнера и сохранении общей массы имеет ряд серьезных недостатков. Свинец может расплавиться во время пожара, что приведет к потере его вследствие разрыва оболочки или перераспределению с образованием радиационных окон (пустот в защите) и возникновением чрезмерно высоких уровней радиации на наружной поверхности. Необходима разработка наружной противопожарной защиты и достаточной толщины наружной стальной оболочки, предохраняющей контейнер при падении в аварийной ситуации, а также внутренней облицовки.

Применение урана в качестве γ -защиты в США объясняется стремлением максимально уменьшить массу контейнера, чтобы использовать автотранспорт вследствие высокого уровня развития и отсутствия на многих АЭС подъездных железнодорожных путей. В контейнерах с урановой защитой для предотвращения возможности образования эвтектики со стальной оболочкой, имеющей низкую температуру плавления и выходящую из строя в условиях пожара, используются различного рода пористые мембраны из меди или вольфрама. Эти контейнеры должны иметь наружную и внутреннюю оболочки из стали. В последнее время считается перспективным применять в будущем контейнеры из стали со сплошными стенками, в особенности для отработавшего горючего быстрых реакторов благодаря простоте их конструкции, хорошему отводу тепла и конструктивной целостности.

Наружные оболочки контейнеров выполняются обычно из нержавеющей или черной стали с покрытием. Для отработавшего горючего водо-водяных реакторов с выгоранием порядка 40 000 МВт·сут/т, а также для горючего быстрых реакторов вследствие значительного количества тяжелых изотопов плутония и трансплутониевых элементов, имеющих собственное нейтронное излучение, в конструкции контейнера, кроме защиты от γ -излучений, требуется предусматривать и защиту от нейтронов. Для поглощения γ -квантов применяется комбинированная защита, состоящая из металла, для замедления нейтронов — из воды или другого водорода-

содержащего материала; для поглощения замедленных нейтронов — из бора или кадмия.

Теплоотвод

В соответствии с правилами МАГАТЭ температура наружной поверхности контейнера не должна превышать 82°C при температуре окружающего воздуха 38°C . Максимально допустимое давление в контейнере не должно быть более 686 кН/м^2 (7 кгс/см^2). При этом для обеспечения безопасности желательнее в конструкции контейнера не использовать системы принудительного охлаждения, так как они в условиях аварии неизбежно выйдут из строя.

Как показывают многочисленные исследования, с 1 м^2 стальной пластины при температуре окружающего воздуха 38°C и температуре стенки контейнера 82°C можно отвести около 250 Вт тепла за счет конвекции и излучения, если эта пластина вертикальна, и на 50 Вт больше для горизонтальной пластины.

Поверхность контейнера для перевозки отработавшего горючего реактора ВВЭР-440 составляет около 30 м^2 , что позволяет отвести около 15 кВт тепла без оребрения и систем принудительного охлаждения. Величину теплоотвода можно увеличить в $1,5\text{--}2$ раза в результате применения оребрения с боковых сторон.

Отвод тепла часто ограничивает число перевозимых в одном контейнере сборок. Для улучшения условий теплопередачи от отработавшего горючего к наружной поверхности внутренней полости контейнера, как правило, заполняется водой или другим теплоносителем. Различают два принципиально возможных способа транспортирования: «сухой» и «мокрый». При «сухой» перевозке ограничивающим фактором является максимально допустимая температура горючего, при «мокрой» — давление во внутренней полости контейнера. Предполагается, что при перевозке отработавшего ядерного горючего быстрых реакторов с малым временем выдержки и большим тепловыделением лучшим теплоносителем будет жидкий натрий [10].

Чтобы температура оболочки твэлов и давления во внутренней полости контейнера в условиях пожара были в допустимых пределах, в конструкции контейнера часто предусматриваются различные прослойки, препятствующие передаче тепла во внутреннюю полость во время пожара и обеспечивающие требуемый теплоотвод в нормальных условиях перевозки. Например, в корпусе контейнера для отработавшего горючего реактора «Диори» (Швейцария)

есть прослойка из влажного гипса, который высыхает при пожаре и уменьшает теплопередачу.

Для этих же целей в США разработана теплоизоляция на основе окиси алюминия и окислов железа, содержащая большое количество связанной воды. Ведется разработка специальных конструкционных материалов с односторонней проводимостью.

При «мокрой» транспортировке (особенно горючего с большой остаточной активностью) предусматриваются различные мероприятия, которые могут предотвратить возможность образования и взрыва гремучей смеси в условиях перевозки: каталитическое сжигание водорода на платиновых катализаторах; введение в газовую полость флегматизирующего газа (например, CO_2); заполнение контейнера водой высокой чистоты для резкого сокращения выделения водорода; сплавка выделяющегося водорода в специальную емкость.

Ядерная безопасность

При разработке конструкции транспортного упаковочного комплекта должны быть обеспечены такие условия, чтобы в любых предвидимых ситуациях перевозки не могла возникнуть самопроизвольная цепная ядерная реакция (СЦР). Особенно следует учитывать возможность перегруппировки содержимого в более реактивные системы внутри контейнера; уменьшение эффективности встроенных поглотителей или замедлителей нейтронов; увеличение реактивности в результате изменений температуры; возможное проникновение воды в контейнер при попадании его в воду или снег.

Ядерная безопасность может обеспечиваться, например, введением в конструкцию контейнеров различных замедлителей и нейтронных ядов, регулированием возможной геометрии и степени замедления и т. п.

Конструкция транспортных упаковочных комплектов

Физические, технические и экономические особенности отработавшего ядерного горючего оказывают большое влияние на конструкцию транспортного упаковочного комплекта.

Создание приемлемой конструкции транспортного упаковочного комплекта для перевозки отработавшего ядерного горючего — это решение многих противоречивых проблем, выдвигаемых требованиями «Правил безопасной перевозки

Характеристика транспортных контейнеров

Таблица 2

Реактор	Форма контейнера	Масса, т	Размеры, м	Толщина защиты, мм	Вес горючего, шт.	Число сборок, шт.	Заполнение внутренней полости (средство теплопередачи)
ВВЭР-440	Вертикальный цилиндр	90	$\varnothing 2,3$; $H = 4,4$	Сталь; 400	3,8 (UO ₂)	30	Вода, инертный газ
ВВЭР-1000	Горизонтальный цилиндр	110	$\varnothing 2,4$; $L = 6,1$	Сталь; 410	3 (UO ₂)	6	Вода
АЭС «Рейнсберг» (ГДР)	Вертикальный цилиндр	80	$\varnothing 3$; $H = 4,3$	Сталь; 350	3,9 (UO ₂)	30	Азот, вода
КС-150 (ЧССР)	Горизонтальный параллелепипед	78	1,68·1,2; $L = 6,1$	Сталь; 385	2,7 (уран природный)	16	Водный раствор K ₂ Cr ₂ O ₇ , инертный газ
ВВЭР или РВЭР (контейнер JE-300) *	Горизонтальный цилиндр	70	$\varnothing 1,5$; $L = 5,4$	Уран; сталь	до 4 (UO ₂)	18 (ВВЭР) или 7 (РВЭР)	Вода

* Перевозка осуществляется по железной дороге и специальным автотранспортом.

радиоактивных веществ» и экономикой транспортировки.

Правила перевозки очень строги, и конструкция транспортных упаковочных комплектов должна обеспечить невозможность возникновения СЦР, ослабления биологической защиты и нерегламентированной утечки активности в любых предвидимых условиях перевозки, в том числе и аварийных, что требует больших затрат.

Как правило, транспортный упаковочный комплект для перевозки отработавшего ядерного горючего состоит из транспортного контейнера, транспортной емкости в виде чехла и герметичного пенала [11]. Транспортный контейнер — это толстостенный, герметично закрывающийся сосуд, выполняющий функции биологической защиты и удерживающий активность в любых предвидимых условиях перевозки. Транспортный чехол представляет собой много-

местную емкость, которая обеспечивает фиксированное геометрическое расположение отработавших сборок твэлов или герметичных пеналов с отработавшими сборками в любых предвидимых условиях перевозки и хранения и упрощает технологические операции при загрузке — разгрузке транспортного контейнера.

Герметичный пенал — это сосуд, в который устанавливается отработавшая сборка с повреждением оболочек твэлов. Он предотвращает распространение активности во внутреннюю полость транспортного контейнера или в среду хранилища.

При необходимости транспортный упаковочный комплект оборудуется системой контроля параметров во внутренней полости контейнера (температура, давление) и системами нейтрализации, или сжигания водорода, образующегося во внутренней полости контейнера в результате радиолитической воды, и другими устройствами.

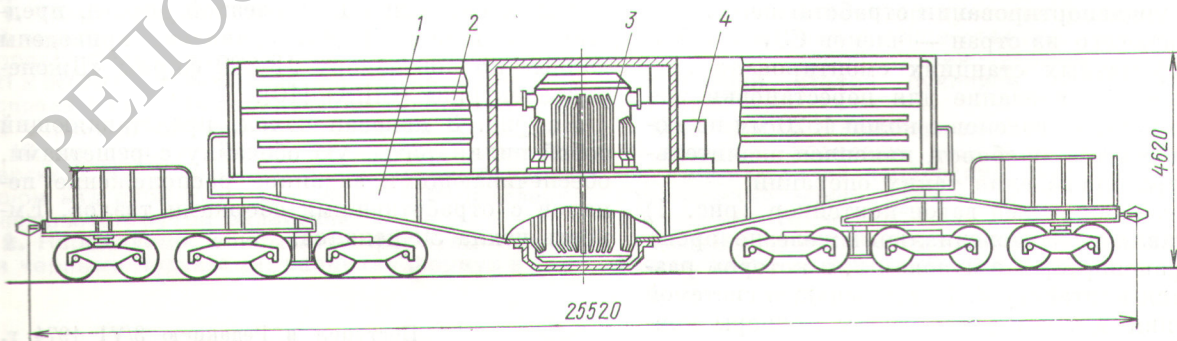
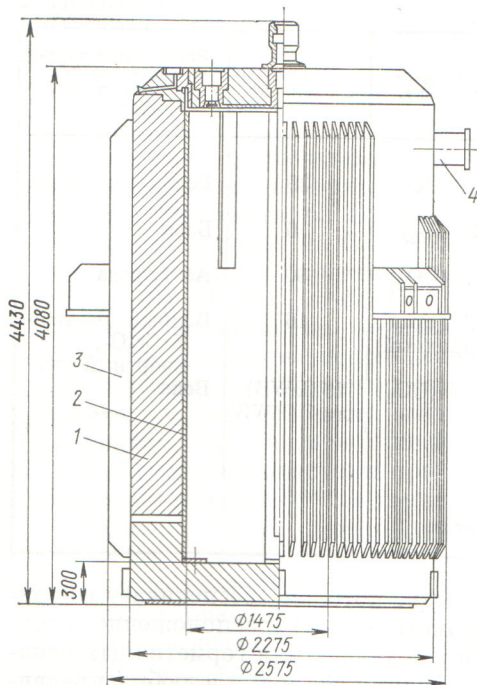


Рис. 1. Железнодорожный вагон-контейнер для перевозки отработавшего горючего АЭС с реакторами ВВЭР-440



Р и с. 2. Транспортный контейнер:

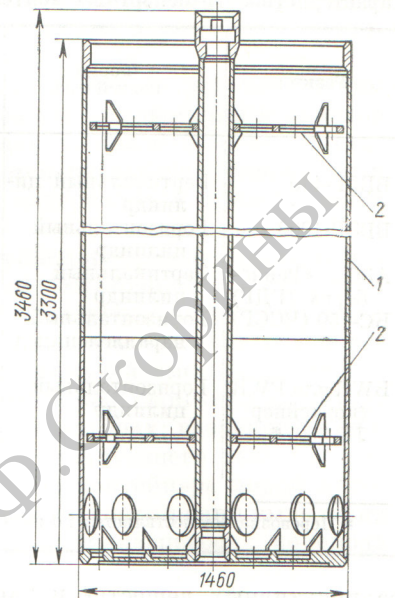
1 — корпус; 2 — внутренняя облицовка; 3 — ребро; 4 — цапфа

Конструктивное решение транспортного установочного комплекта зависит от технических и физических характеристик отработавших сборок твэлов, подлежащих транспортированию, компоновочных решений АЭС и заводов регенерации и применяемого вида транспорта.

В СССР в основном для перевозки отработавшего ядерного горючего применяется железнодорожный транспорт как наиболее рациональный на большие расстояния. Кроме того, по железной дороге отработавшее горючее можно транспортировать в контейнерах большей массы, и за один рейс может быть перевезено большее число упаковочных комплектов.

При транспортировании отработавшего ядерного горючего из стран — членов СЭВ в СССР на пограничных станциях смонтировано специальное оборудование для перестановки железнодорожных вагонов с колеи 1520 мм на колею 1435 мм и наоборот, накоплен значительный опыт проведения таких операций.

Железнодорожный вагон-контейнер (рис. 1) представляет собой специальный железнодорожный транспортер 1 с кузовом 2, в котором размещается контейнер 3. Кузов оснащен системой отохлаждения 4, в нем установлены приборы контроля технологических параметров контейнера



Р и с. 3. Чехол:

1 — цилиндрическая обечайка; 2 — решетка

(температуры, давления, содержания водорода) и другое специальное оборудование. Для установки и снятия транспортного контейнера кузов имеет раскрывающуюся крышу.

На рис. 2 показан транспортный контейнер для перевозки отработавших сборок твэлов. Материал контейнера — углеродистая сталь, внутренняя облицовка выполнена из нержавеющей стали. На корпусе контейнера расположены ребра, смягчающие удар при падении и увеличивающие поверхность теплоотвода. Для перестановки контейнера на корпусе предусмотрены специальные цапфы.

Характеристики некоторых изготовленных и проектируемых в СССР и странах — членах СЭВ транспортных контейнеров, предназначенных для перевозки по железной дороге, представлены в табл. 2. Для сравнения приведены данные по контейнеру JF-300 фирмы «Дженерал электрик» (США) [10].

На рис. 3 показан чехол, представляющий собой цилиндрическую обечайку с решетками, обеспечивающими заданное расположение пеналов с отработавшими сборками твэлов. Емкость чехла 30 пеналов.

Поступил в Редакцию 3/VI 1974 г.
В окончательной редакции 23/I 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петросьянц А. М. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 4, стр. 315.
2. Денисов В. П. и др. Там же, с. 323.
3. Правила безопасной перевозки радиоактивных веществ. Пересмотренное издание 1973 г. Вена, МАГАТЭ, 1973.
4. Нормы радиационной безопасности, НРБ-69, № 821-А-69. М., Атомиздат, 1972.
5. Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений. ОСП-72, № 950-72. М., Атомиздат, 1973.
6. Anordnung uber den Transport radioaktiver Stoffe-ATRS, DDR, 1967, v. 10.
7. Anordnung Nr 2 uber den Transport radioaktiver Stoffe. DDR, Februar 1974, v. 11.
8. «Nucl. Engng Intern.», 1974, v. 19, N 213, p. 104.
9. «Nucl. Engng Intern.», 1973, v. 18, N 204, p. 429.
10. Jenail B. In: Proc. IAEA «Specialists meeting on handling and transportation of Spent Fuel elements for LMFBR'S». Rome, 26—28 April 1972.
11. ГОСТ 19541-74. Средства транспортирования отработавших сборок тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. Термины и определения.

ПОРЯДОК ДЕПОНИРОВАНИЯ СТАТЕЙ

Депонирование статей осуществляется или по просьбе авторов, или по решению редакционной коллегии журнала.

В журнале печатаются подробные аннотации статей, а полные тексты хранятся в редакции в течение 5 лет и высылаются читателям по их требованию наложенным платежом. Объем аннотации не должен превышать 2 стр. машинописного текста, а объем депонируемого текста — 12 стр. В отдельных случаях в аннотацию можно включать рисунок, таблицу, основные формулы и т. п. (уменьшив соответственно объем текстового материала аннотации).

Депонированные статьи являются научными публикациями и учитываются при защите диссертаций.

Статьи, представленные для депонирования, должны быть окончательно обработаны авторами и пригодны для фотографического воспроизведения (первый экземпляр), в связи с чем необходимо соблюдать следующие правила их подготовки:

1. Текст следует печатать на машинке с жирной черной лентой через два интервала на одной стороне белой односторонней бумаги форматом 21×30 см с полями слева и внизу не менее 3 см и справа 1 см. При перепечатке текста на первой странице оригинала необходимо отступать на 10 см сверху (место для клише «Атомная энергия»). Никакие поправки чернилами или карандашом над словами не допускаются. Исправления выполняются путем вклеивания.

2. Необходимо вписывать формулы тушью или черными чернилами; разметку формул в тек-

сте (подчеркивание красным или синим карандашом и т. д.) делать не следует.

3. Рисунки необходимо выполнять на ватманской бумаге или кальке, наклеивать их на стандартные форматные страницы и помещать в конце статьи, после таблиц и списка литературы. Каждый рисунок следует снабжать подрисуночной подписью. Рисунки должны быть достаточно отчетливыми для фотографического воспроизведения. Включение в рукопись тоновых рисунков не допускается в связи с трудностью их копирования. В необходимых случаях тоновый рисунок выполняется штриховым методом.

4. Допускаются в виде исключения печатать отдельные (большие) таблицы на неформатных листах (вклейках).

5. Все страницы рукописи (включая приложение) должны быть пронумерованы (первой страницей считается титульный лист, на нем цифра «1» не ставится, на следующей странице представляется цифра «2» и т. д.). Порядковый номер печатается в середине верхнего поля страницы.

6. Первый экземпляр рукописи должен быть подписан автором в конце статьи.

В случае несоблюдения указанных правил оформления статей рукописи возвращаются авторам.

Цена одного экземпляра депонируемого текста 40 коп. При оформлении заказа на тексты депонированных статей необходимо указывать регистрационный номер статьи, который помещен в конце аннотации.

Заказы направлять в редакцию журнала по адресу: Москва, Центр, ул. Кирова, 18. Тел. 223-72-73.