

1. Колобашкин В.Н., Ружанский П.М., Сидоренко В.Д. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Фролов В.В. Ядерно-физические методы контроля делящихся материалов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Основные правила безопасности и физической защиты при перевозке ядерных материалов (ОПБЗ-83). М., ЦНИИатоминформ, 1984.
4. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов. Требования № ST-1, МАГАТЭ, Вена, 1996.
5. Arnautova M.A., Kandiev Ya.Z., Lukhminsky B.E., Malishkin G.N. Monte Carlo simulation in nuclear geophysics. Incomparision of the PRIZMA Monte Carlo program and benchmark experiments. — Nucl. Geophys., 1993, v. 7, № 3, p. 407—418.
6. RSICC Computer Code Collection MCNP-4A. Monte Carlo *N*-Particle Transport Code System. Los Alamos, 1993.

Поступила в Редакцию 22.12.05

УДК 621.039.546.3

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНОГО УПАКОВОЧНОГО КОНТЕЙНЕРА С ОТРАБОТАВШИМ ТОПЛИВОМ

Кудрявцев А.В., Овсянникова Е.А. (РФЯЦ — ВНИИТФ)

Требования к защитным характеристикам контейнера для хранения и перевозки отработавшего топлива определяются государственными и международными нормативными документами. Применительно к ТУК-84 они сформулированы следующим образом:

температура оболочек твэлов не должна превышать 350 °С в условиях нормальной эксплуатации. При аварии допускается однократное повышение до 380 °С в течение 24 ч;

его конструкция должна обеспечивать пассивный отвод тепла, генерируемого ТВС (тепловыделение ТВС с шестилетней выдержкой составляет 22 Вт), при этом температура любой наружной легкодоступной поверхности при нормальных условиях эксплуатации не должна превышать 85 °С.

Контейнер должен сохранять работоспособность в нормальных условиях эксплуатации:

при воздействии температуры окружающей среды от –50 до 45 °С и инсоляции в течение 12 ч в сутки не более 942 Вт/м² на горизонтальную и не более 532 Вт/м² на вертикальную поверхность;

при суммарном тепловыделении размещенных в ТУК-84 ТВС не более 770 Вт.

В аварийных условиях контейнер должен сохранять работоспособность при тепловом воздействии пожара со среднеобъемной температурой 800 °С в течение 30 мин с коэффициентом эмиссии (степени черноты пожарной среды) не менее 0,9 и коэффициентом поглощения не менее 0,8, что примерно соответствует тепловому воздействию пожара железнодорожной цистерны с нефтепродуктами.

Температурное состояние системы герметизации и элементов контейнера в районе крышки рассчитывали с помощью программ, в которых реализован численный метод дифференциальных тепловых балансов вычисления нестационарных полей сложных конструкций. Расчеты температурных режимов элементов системы

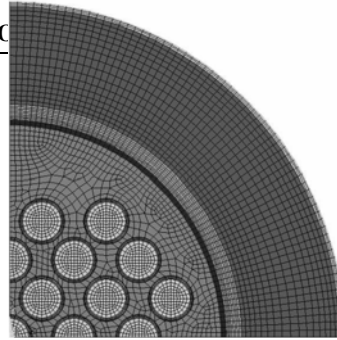
контейнер—чехол—ТВС в районе активной зоны были выполнены по программе ANSYS [1], позволяющей определить сложный лучистый теплообмен между внутренними элементами конструкции (рис. 1).

С учетом приведенных требований, начальных и граничных условий были разработаны теплофизические математические модели системы контейнер—чехол—ТВС. Их калибровка предполагала, в частности, уточнение эквивалентного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$ рулонированной обечайки корпуса контейнера с помощью расчетно-экспериментального метода. Для подтверждения работоспособности системы герметизации и теплозащитных характеристик контейнера, а также коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$ использовали результаты испытаний модели-прототипа. Модель-прототип представляла собой сосуд высокого давления и состояла из корпуса, который изготовлен методом спиральной навивки из материалов, идентичных штатным, и герметизирующей крышки, соответствующей в части герметизации конструкции штатного контейнера.

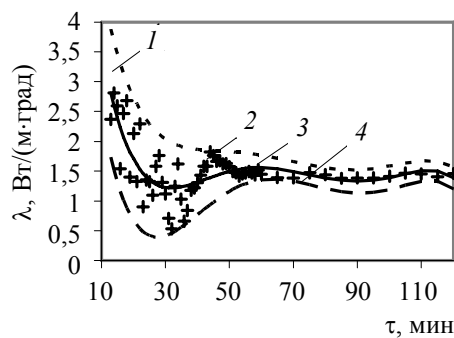
Испытания на непосредственное воздействие пламени горящего керосина со среднеобъемной температурой $\geq 800^\circ\text{C}$ в течение ≥ 30 мин проводили на огневом стенде. Экспериментальные данные о нагреве элементов конструкции и воздуха внутри модели-прототипа позволили провести калибровку теплофизической математической модели объекта испытаний и соответственно штатного контейнера для последующего расчетного подтверждения теплозащитных характеристик. Результаты определения $\lambda_{\text{экв}}$ в виде аппроксимированных зависимостей от времени математического ожидания и доверительных границ, рассчитанных с вероятностью $P=0,9$ по алгоритму обработки результатов испытаний в соответствии с ОСТ В95 2605-90, приведены на рис. 2.

Анализ температурных режимов модели-прототипа, рассчитанных по уточненной теплофизической модели, показал, что при коэффициентах теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$, соответствующих аппроксимированной зависимости математического ожидания, отличия расчетной и экспериментальной максимальной температуры элементов конструкции и воздуха внутри модели-прототипа не превышают 18%. Указанные отличия с учетом принятой для тепловых расчетов погрешности 20% позволили полагать теплофизические модели прототипа и соответственно штатного контейнера откалиброванными.

Стационарное тепловое поле системы контейнер—чехол—ОТВС в нормальных условиях эксплуатации было рассчитано с использованием откалиброванной теплофизической модели. В каждом расчетном элементе тепловой модели активной зоны ТВС задавали источник тепловыделения



Р и с. 1. Конечно-элементная модель системы контейнер—чехол—ТВС в районе активной зоны



Р и с. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности рулонированной обечайки от времени: 1 — верхняя доверительная граница; 2 — экспериментальные значения; 3 — математическое ожидание; 4 — нижняя доверительная граница

мощностью 22 Вт, распределенной пропорционально массовой теплоемкости расчетного элемента. Кроме задания источников внутреннего тепловыделения ТВС, учитывали воздействие солнечного излучения. Полагали, что контейнер расположен горизонтально, так как при вертикальном положении инсоляция оказывает меньшее влияние на тепловое состояние элементов конструкции. Коэффициент поглощения солнечной радиации был принят равным 0,7. Также учитывали цикличность воздействия инсоляции в течение 4 сут, что согласно ГОСТу 16350-80 соответствует умеренному климатическому району.

Расчеты проведены в предположении, что тепло от наружной поверхности контейнера отводится за счет естественной конвекции и в результате лучистого теплообмена с внешними объектами, температура которых полагалась равной температуре окружающего воздуха. Степень черноты наружной поверхности корпуса контейнера и внешних объектов принималась равной степени черноты окисленной стали $\epsilon = 0,8$. Коэффициент конвективного теплообмена контейнера с окружающим воздухом оценивался равным $\alpha_k = 7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ для цилиндрических горизонтальных поверхностей диаметром $\geq 1 \text{ м}$ [2].

При расчете температурных режимов системы герметизации в районе крышки коэффициент конвективного теплообмена внутренних элементов контейнера и его загрузки с воздухом внутренних объемов определяли по известным соотношениям для теплопередачи в условиях свободной конвекции [3]. Расчеты стационарных температурных полей проведены как оценка сверху при задании постоянного коэффициента теплопроводности рулонированной обечайки $\lambda_{\text{экв}} = 1,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$, который соответствовал средневзвешенному значению аппроксимированной нижней доверительной границы, определенной на участке естественного остывания конструкции.

Результаты расчетов температурного состояния основных элементов ТВС, пены и контейнера свидетельствуют о том, что максимальная температура оболочки твэлов достигает 92°C , что значительно ниже допустимой 350°C . Нагрев наружной поверхности корпуса контейнера в активной зоне достигает 69°C , который не превышает допустимый 85°C .

Время тепловой инерции контейнера с загрузкой составляет 5 сут. Оно определено по времени установления стационарного состояния внутренних элементов ТВС, когда перепад температуры самого теплоинерционного элемента модели и окружающей контейнер среды, отнесенный к перепаду температуры в начальный момент, не превышает 3% [4].

При расчете температурных режимов контейнера в условиях теплового воздействия пожара в качестве начальных условий задавали стационарные поля температуры конструктивно-тепловых схем элементов конструкции, рассчитанные для нормальных условий эксплуатации. В качестве внешней тепловой нагрузки принимали воздействие пожара со среднеобъемной температурой 800°C в течение 30 мин с последующим линейным спадом температуры до 45°C в течение 30 мин. Полагали, что тепловая нагрузка распределена равномерно по всей поверхности контейнера. На поверхностях конструкции, взаимодействующих со средой очага пожара, задавали условие конвективного теплообмена и теплообмена излучением с пожарной средой. Коэффициент конвективного теплообмена со средой очага пожара составляет $30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ при непосредственном огневом воздействии пожара,

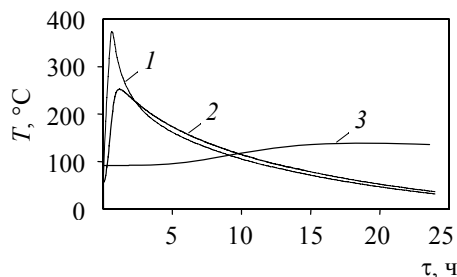
15 Вт/(м²·град) при тепловом безогневом воздействии пожара (на стадии спада температуры) и 7 Вт/(м²·град) при остывании в естественных условиях воздействия окружающей среды. При расчете лучистого теплообмена между поверхностью контейнера и средой очага пожара степень черноты светящегося пламени и покрытой копотью поверхности корпуса принимали равной $\varepsilon = 0,9$. В качестве оценки сверху принимали верхнюю доверительную границу расчетно-экспериментальной зависимости $\lambda_{\text{экв}}(\tau)$, приведенную на рис. 2.

Результаты расчета нестационарного теплообмена в системе контейнер—чехол—ТВС в условиях воздействия пожара при начальной температуре 45 °С приведены на рис. 3.

Как показывают расчетно-экспериментальные оценки, в условиях теплового воздействия пожара максимальная температура твэлов с учетом собственного тепловыделения составляет 139 °С и не превышает допустимую 380 °С, герметизирующих прокладок — 252 °С, что существенно ниже допустимой 500 °С [5]. Это позволяет сделать вывод о герметичности контейнера.

Таким образом, расчетно-экспериментальным методом подтверждены сохранение работоспособности системы герметизации контейнера и обеспечение его теплозащитных характеристик в условиях нормальной эксплуатации и воздействия аварийных тепловых нагрузок.

В нормальных условиях эксплуатации разогрев оболочек твэлов и любой легкодоступной поверхности контейнера существенно ниже критического: температура оболочек твэлов не превышает 92 °С при критической 350 °С, температура наружной поверхности — не более 69 °С и не превышает критическую 85 °С. При воздействии аварийной тепловой нагрузки, определяемой нормами МАГАТЭ и соответствующей пожару со среднеобъемной температурой среды 800 °С в течение 30 мин, температура оболочек твэлов ниже критической 380 °С и составляет 139 °С.



Р и с. 3. Зависимость от времени температуры герметизирующих прокладок крышки пенала (1), герметизирующих прокладок крышки контейнера (2), оболочки центрального твэла (3)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ANSYS. Руководство пользователя. Регистрационный номер ПС в ЦОЭП при РНЦ КИ — 490. Регистрационный номер паспорта аттестации ПС — 145. Дата регистрации 10.09.2002.
2. Хижняков С.В. Практические расчеты тепловой изоляции. Л.: Энергия, 1964.
3. Михеев М.А. Основы теплопередачи. М.—Л.: Госэнерго, 1965.
4. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990.
5. Прокладки спирально навитые. ОСТ 26.260.454-99. Госстандарт Российской Федерации, 1999.

Поступила в Редакцию 22.12.05

УДК 621.039.546.3

ГЕРМЕТИЧНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ УПАКОВОЧНЫХ КОМПЛЕКТОВ

Казеев В.Г., Рубан Г.С., Сулейманов Р.Х., Хакимзянов В.Ш. (РФЯЦ — ВНИИТФ)