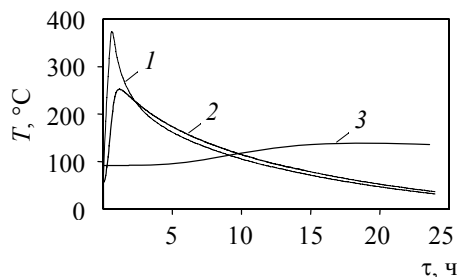


15 Вт/(м²·град) при тепловом безогневом воздействии пожара (на стадии спада температуры) и 7 Вт/(м²·град) при остывании в естественных условиях воздействия окружающей среды. При расчете лучистого теплообмена между поверхностью контейнера и средой очага пожара степень черноты светящегося пламени и покрытой 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)

Важнейшим параметром упаковочного комплекта является герметичность, которая определяется степенью непроницаемости стенок, сварных швов, разъемных соединений, ограничивающих внутренний объем, и характеризуется объемным количеством вещества (в газообразном или ином состоянии), проникающего из внутреннего объема (или в него) во внешнюю среду в единицу времени ($\Delta V/\Delta t$). Герметичность обеспечивается двухступенной (барьерной) схемой защиты от возможных недопустимых утечек радиоактивного содержимого в окружающую среду.

Первой ступенью защиты является тонкостенный пенал, в который помещается чехол с ТВС, элементами герметизации и крышкой, второй — корпус с элементами герметизации и наружной крышкой. Учитывая, что упаковочный комплект предназначен для длительного хранения топлива (не менее 50 лет), при его разработке принято, что каждая степень герметизации ограничивает потери радионуклидов в соответствии с требованиями ОПБЗ-83 для комплекта в целом. При таком подходе повышается гарантия ограничения потерь радионуклидов в нормальных условиях эксплуатации и снижаются потери в случае повреждения корпуса в условиях аварийных воздействий. Согласно нормам упаковочный комплект соответствует категории радиационной опасности III. Максимальное нормальное (избыточное) рабочее давление в герметичных объемах составляет 0,7 МПа. Допустимая объемная потеря газовой среды рассчитана применительно к ТУК-84/1 для 35-местных чехлов. Требования к герметичности определяются максимально допустимой потерей радионуклидов из упаковочного комплекта, зависящей от их радиационной опасности и определяемой нормами ОПБЗ-83 [1].

В соответствии с нормами [1] при эксплуатации комплекта максимально допустимая потеря (утечка) радионуклидов $A_{\text{доп}}$ не должна превышать в нормальных условиях транспортирования $A_{\text{доп}} \leq A_2 \cdot 10^{-6}$, условиях проектной аварии $A_{\text{доп}} \leq (A_2/168)$, где A_2 — предельная активность газа, Бк.

При выдержке отработавшего ядерного топлива перед транспортировкой более 10 лет из газообразных радионуклидов достаточно учесть только ^{85}Kr , так как он имеет большой период полураспада. Для ^{85}Kr предельная активность $A_2 = 3,7 \cdot 10^{13}$ Бк [1]. Удельная активность $A_{\text{уд}}$, соответствующая его содержанию в ТВС, принята равной $1,73 \cdot 10^{14}$ Бк/т согласно данным [2]. В упаковочный комплект загружается около 1 т топлива и консервативно предполагается, что в свободный внутренний объем высвобождается 100% наработанного ^{85}Kr с интегральной активностью, которая определяется по формуле

$$A_{\text{инт}} = A_{\text{уд}} m, \quad (1)$$

где m — масса отработавшего ядерного топлива, т. При $A_{\text{уд}} = 1,73 \cdot 10^{14}$ Бк/т и $m = 1$ т по формуле (1) получим $A_{\text{инт}} = 1,73 \cdot 10^{14}$ Бк. Объемная концентрация в свободном внутреннем объеме упаковочного комплекта и пенала составит $0,346 \cdot 10^8$ и $0,396 \cdot 10^8$ Бк/см³ соответственно. Допустимая объемная потеря газовой среды упаковочного комплекта в единицу времени $1,069$ см³/ч при нормальных условиях эксплуатации, $0,64 \cdot 10^4$ см³/ч — при проектной аварии. Допустимая объемная потеря газовой среды пенала при нормальных условиях эксплуатации равна $0,93$ см³/ч, при проектной аварии — $0,55 \cdot 10^4$ см³/ч.

Герметичность конкретных конструкций принято характеризовать течью, которая определяется для стандартизованных условий. Течь — это поток воздуха че-

рез щели между объемами давлением 0 и 0,1 МПа при 20 °С. Для герметичных объемов, содержащих отличный от воздуха газ с избыточным внутренним давлением, допустимая течь определяется по формуле

$$B = P_2 \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right)_{\text{доп}} \frac{\eta}{\eta_v} \frac{P_1^2}{P_2^2 - P_1^2} 10^6, \quad (2)$$

где P_1 , P_2 — давление вне и внутри герметичного объема соответственно, МПа; η_v , η — коэффициент динамической вязкости воздуха при 20 °С и газа в герметичном объеме, Па·с; $(\Delta V/\Delta t)_{\text{доп}}$ — допустимая объемная потеря газовой среды в единицу времени, м³/с. Допустимая течь рассчитывается при минимальной вязкости газа и максимально возможном давлении внутри герметичного объема. Минимальная вязкость газа реализуется при минимально возможной температуре, что следует из формулы [3]

$$\eta = \eta_0 (1 + \alpha C) / (1 + C/T) \sqrt{\alpha T},$$

где η_0 — коэффициент динамической вязкости газа при 20 °С, Па·с; α — коэффициент теплового расширения газа, 1/°С; C — постоянная Сюзерленда; T — абсолютная температура, °С.

В зависимости от допустимой течи назначается класс герметичности согласно правилам [4] и методике [5].

В качестве примера приведем результаты расчета норм герметичности ТУК-84/1, пенала РТ5015.02.000 и определим класс герметичности. Расчет проведен при следующих исходных данных:

параметры среды внутренних объемов комплекта и пенала, заполненных воздухом, — $T = T_{\min} = -50$ °С, $P_2 = P_2^{\max} = 0,8$ МПа, $\alpha = 3,67 \cdot 10^{-3}$ 1/°С, $C = 120$, $\eta_0 = 1,71 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\eta = 1,45 \cdot 10^{-5}$ Па·с;

давление наружного воздуха $P_1 = P_0 = 0,1$ МПа;

коэффициент динамической вязкости воздуха при 20 °С [3] $\eta = 1,81 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

Течь, определенная по формуле (2), для нормальных условий эксплуатации упаковочного комплекта и пенала составляет $\leq 3 \cdot 10^{-6}$ и $\leq 2,6 \cdot 10^{-6}$ м³·Па/с соответственно. Согласно методике [5] эти значения соответствуют классу герметичности IV (диапазон $6,7 \cdot 10^{-7}$ — $6,7 \cdot 10^{-6}$ м³·Па/с), для проектной аварии — $\leq 1,8 \cdot 10^{-2}$ и $\leq 1,6 \cdot 10^{-2}$ м³·Па/с соответственно, что намного выше нормы низшего класса герметичности V [5] (до $6,7 \cdot 10^{-4}$ м³·Па/с). Класс герметичности определяет выбор системы ее контроля, т.е. способа, режимов контроля и подготовки комплекта и пенала к контролю в соответствии с методикой [5]. Завод-изготовитель указывает в производственно-технологической документации конкретный метод контроля. Контроль герметичности проводится в целях выявления течей, обусловленных наличием сквозных трещин, непроваров, прожогов, разрывов и др. в металлических материалах, сварных и разъёмных соединениях. Он основан на применении разных веществ и регистрации их проникновения через течь.

Для заданных требований герметичности (допустимой течи) и реальных параметров конструкции комплекта и пенала единственным из определенных методикой [5] простым, надежным и безопасным методом контроля, который позволяет

определять не только места течей, но и их соответствие классу герметичности, является жидкостной компрессионный, т.е. гидравлический способ контроля [5]. Он пригоден для всех типов изделий, в которых можно создать избыточное давление воды и контролируемые участки поверхности доступны для наблюдений. Преимуществом метода является также возможность совместить испытания на прочность и герметичность. Гидравлический способ контроля герметичности состоит в том, что в изделие закачивается вода под давлением, места протечки устанавливаются визуально по появлению влаги на поверхности, а степень герметичности оценивается количеством воды, вытекающей в единицу времени. Методикой [5] для класса герметичности IV при нормальных условиях эксплуатации предусмотрен гидравлический способ ее контроля после воздействия давления воды ≥ 2 МПа. Конструкция комплекта и пенала, контролируемая жидкостным методом, должна обеспечивать как заполнение его водой с исключением образования воздушных подушек, так и ее полное удаление после испытаний.

Гидравлическое испытание проводится с крепежом и прокладками, предусмотренными технической документацией. Температура воды составляет 5—40 °С [6]. Разность температуры поверхности комплекта или пенала и окружающего воздуха не должна вызывать конденсацию влаги на его поверхности, т.е. температура поверхности не должна быть ниже температуры окружающего воздуха. Давление воды следует повышать до достижения заданного давления, затем снижать до максимального нормального рабочего со скоростью не более 0,5 МПа в 1 мин. Время выдержки под давлением при толщине стенки до 50 мм (пенал) должно быть не менее 10 мин [6], при толщине 220 мм (корпус контейнера) — не менее 40 мин. Давление контролируется двумя одинаковыми манометрами с классом точности не хуже 2,5. Поскольку методика [5] предусматривает использование манометров с пределом измерения на 1/3 больше заданного давления, то, например, для давления 2 МПа верхний предел показаний манометра должен быть 2,7 МПа. Из стандартного ряда по ГОСТу 2405-88 этому требованию соответствуют манометры с диапазоном от 0 до 2,5 МПа. Основная погрешность измерения давления для класса точности не хуже 2,5 составит не более 0,06 МПа.

Для выявления возможной течи на стыке крышки с корпусом при гидравлическом испытании упаковочный комплект должен находиться в горизонтальном положении. Осмотр наружной поверхности, разъемных и сварных соединений проводят при максимальном нормальном (избыточном) рабочем давлении в герметичном объеме 0,7 МПа. При проектной аварии требования по допустимой течи не соответствуют даже низшему классу герметичности V. В связи с этим герметичность целесообразно оценивать при гидравлических испытаниях по расходу (количеству вытекающей из герметичного объема) воды в единицу времени ($\Delta V_{\text{ж}}/\Delta t$). Для этого, зная допустимую течь для воздуха, можно определить в единицу времени допустимый расход воды ($\Delta V_{\text{ж}}/\Delta t$)_{доп}. Предельную оценку этого расхода можно получить, предполагая, что поперечное сечение канала течи имеет форму круга, и используя закон Пуазейля [3], который определяет расход воды (поток) в единицу времени через канал течи по формуле

$$\frac{\Delta V_{\text{ж}}}{\Delta t} = \frac{\pi (P_2 - P_1) d^4}{128 \eta_{\text{ж}} l}, \quad (3)$$

где d — диаметр сечения канала течи, м; l — длина канала течи, м; $\eta_{\text{ж}}$ — коэффициент динамической вязкости воды при 20 °С, Па·с; $P_2 - P_1$ — перепад давления течи, Па.

Тот же закон определяет расход воздуха (поток) через такой же канал течи по формуле

$$\frac{\Delta V_{\text{в}}}{\Delta t} = \frac{\pi d^4 (P_2^2 - P_1^2)}{256 \eta_{\text{в}} l}, \quad (4)$$

где $\eta_{\text{в}}$ — коэффициент динамической вязкости воздуха при 20 °С, Па·с. Отсюда можно определить соотношение между потоками воды и воздуха через один и тот же канал следующим образом. По формуле (4) определяем течь в стандартизированных условиях (при $P_2 = P_0$, $P_1 = 0$ [3]):

$$B = \frac{\pi d^4 P_0^2}{256 \eta_{\text{в}} l}. \quad (5)$$

Определив по уравнению (5) отношение $\pi d^4 / 128 l$, равное $2 B \eta_{\text{в}} / P_0^2$, и приняв $P_1 = P_0$, получим с учетом выражения (3) соотношение для определения допустимого расхода воды в единицу времени:

$$\left(\frac{\Delta V_{\text{ж}}}{\Delta t} \right)_{\text{доп}} = \frac{2 B \eta_{\text{в}} (P_2 - P_0)}{P_0^2 \eta_{\text{ж}}}, \quad (6)$$

где B — размер течи, см³·МПа/ч; P_2 — давление воды в герметичном объеме, МПа; P_0 — давление наружного воздуха, МПа. При определении допустимого расхода вытекающей воды по формуле (6) ее вязкость следует принимать соответствующей фактической температуре во время проведения гидравлических испытаний согласно [7].

В качестве примера представим результаты расчета допустимого расхода воды в единицу времени $(\Delta V_{\text{ж}} / \Delta t)_{\text{доп}}$ при проектной аварии и нормальных условиях эксплуатации. Расчет проведен при $\eta_{\text{ж}} = 1004 \cdot 10^{-6}$ Па·с [7], $\eta_{\text{в}} = 1,81 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $P_2 = 2$ МПа, $P_0 = 0,1$ МПа.

Допустимый расход воды в единицу времени, определенный по формуле (6), составляет для упаковочного комплекта и пенала при проектной аварии 445 и 395 см³/ч, для нормальных условий эксплуатации — 0,07 и 0,06 см³/ч соответственно.

Как видно из результатов расчета, оценивать герметичность для нормальных условий эксплуатации по нормам объема вытекающей воды нецелесообразно из-за их малости. Для класса герметичности IV при проверке герметичности элементов конструкции, имеющих небольшие объемы, целесообразно использовать газовый (манометрический) метод. Для контроля изделие заполняют газом под давлением выше атмосферного и выдерживают в течение определенного времени. Изделие считается герметичным, если падение давления газа во время выдержки под давлением не превысит норм, установленных техническими условиями.

Время выдержки (опрессовки) для нормальных условий определяется по формуле

$$t = \frac{\Delta P V_{\Sigma} P_0^2 \eta}{B (P_2^2 - P_1^2) \eta_{\text{в}}}, \quad (7)$$

где ΔP — допустимое изменение давления внутри проверяемого элемента конструкции за время опрессовки, Па; V_{Σ} — суммарный внутренний объем проверяемого элемента конструкции и испытательной системы, м³; P_2 — абсолютное давление опрессовки, МПа; P_1 — абсолютное давление воздуха окружающей среды, МПа; B — допустимая течь, м³·Па/с; P_0 — нормальное атмосферное давление; η , $\eta_{\text{в}}$ — коэффициент динамической вязкости газа и воздуха при температуре 20 °С и $P = P_0$, Па·с.

Допустимое изменение давления опрессовки при минимальном времени выдержки вычисляется по формуле

$$\Delta P = K_T D 10^{-2},$$

где K_T — класс точности манометра, %; D — диапазон показаний манометра, Па.

За время испытаний на герметичность изменение температуры воздуха в производственном помещении относительно нормальной (20 °С) должно быть не более 3 °С, атмосферного давления — не более 5,33 кПа. Газ должен соответствовать первому и высшему сорту по ГОСТам 9293—74 и 10157—79. После заполнения объемов проверяемых элементов конструкции газом должна быть предусмотрена выдержка продолжительностью, которая исключает изменение давления опрессовки при испытаниях, обусловленное разностью температуры газа и элементов конструкции. Для достоверного контроля герметичности при нормальных условиях эксплуатации герметичность испытательной системы должна быть не хуже требуемой герметичности элементов конструкции. В качестве примера представим результаты расчета времени выдержки (опрессовки) элементов конструкции пенала РТ 5015.02.000: проточки в крышке, клапана, переходника, датчика давления. Расчет проведен при исходных данных: пробный газ аргон, $D = 1,6$ МПа, $K_T = 0,6\%$, $P_2 = 1,2$ МПа, $P_1 = P_0 = 0,1$ МПа, $\eta_{\text{Аг}} = 2,23 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\eta_{\text{в}} = 1,81 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $B = 3,2 \cdot 10^{-6}$ м³·Па/с. Время выдержки (опрессовки), определенное по формуле (7), приведено в таблице. Расчеты проведены с учетом объема испытательной системы $30 \cdot 10^{-6}$ м³.

Время выдержки при определении герметичности разных элементов конструкции

Элемент конструкции	$V \cdot 10^6$, м ³	t , мин
Проточка в крышке	60	38,8
Клапан, переходник	40	30,2
Датчик давления	100	56

Результаты испытаний считаются удовлетворительными, если во время их проведения отсутствуют падение давления, протечки воды, трещины, признаки разрывов и остаточной деформации на наружной поверхности изделия, в сварных и разъёмных соединениях. Допускается не считать течью протечки во-

ды через неплотности арматуры, если они не приводят к снижению пробного давления.

Результаты проведенных в 2004 г. испытаний ТУК-84 подтвердили, что его конструкция обеспечивает требуемую герметичность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные правила безопасности и физической защиты при перевозке ядерных материалов (ОПБЗ-83). М., ЦНИИатоминформ, 1984, с. 12, 59.
2. Колобашкин В.М., Ружанский П.А., Сидоренко В.Д. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Ланис В.А., Левина Л.Е. Техника вакуумных испытаний. М.: Госэнергоиздат, 1963.
4. Правила и нормы в атомной энергетике. Оборудование и трубопроводы АЭУ. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля. ПНАЭ Г-7-010-89. М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Контроль герметичности. Газовые и жидкостные методы. ПНАЭ Г-7-019-89. М.: Госатомэнергонадзор, 1990.
6. Оборудование для работы с радиоактивными средами. Общие технические требования. Приемка. Эксплуатация и ремонт. ОСТ 95 10439-91. Свердловск, Свердловский химмаш, 1991.
7. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1988.

Поступила в Редакцию 22.12.05

УДК 621.039.546.3

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ТУК-84 ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА АВАРИЙНЫЕ УСЛОВИЯ ПЕРЕВОЗКИ

Веселков И.Л., Самарин Ю.А., Свидлов А.В., Твердохлебов П.Ю. (РФЯЦ—ВНИИТФ)

Для бросковых испытаний опытного образца ТУК-84 в условиях аварийной ситуации, соответствующей падению с высоты 9 м, выбрано его исходное положение под углом 45° к вертикали. При этом реализуются максимальные напряжения и деформации как в зоне фланцевого соединения силового корпуса с крышкой, так и вследствие изгиба в центральной части силового корпуса в условиях одного эксперимента. При такой ориентации потенциальная энергия контейнера близка к максимально возможной для рассматриваемого случая нагружения. Расчеты показали, что при изменении угла в большую или меньшую сторону возможные повреждения элементов конструкции будут ниже. Расчет кинематических параметров и силовых факторов проведен в целях прогноза конечного положения после падения на жесткое основание стенда и оценки параметров конструктивной доработки стенда ввиду значительных размеров ТУК-84. Расчет проведен методом конечных элементов.

Для проведения расчетов использовали конечно-элементную модель, показанную на рис. 1. В расчетной модели учтены механические свойства материалов их демпферов, поволоков, рулонированных обечаек — царг, лепежа и других силовых элементов). Как показали ранее [1, 2], для выбранного случая нагружения в расчетах изотропные свойства материалов, в том числе и для опытных отсеков.

Рис. 1. Расчетная конечно-элементная модель корпуса контейнера и (а), зона днища (б) и крышки (в)

а — в зоне контакта с преградой в целях минимизации остаточных деформаций до значений, обеспечивающих сохранение его за-

