

РЕЗУЛЬТАТЫ ОДНОВРЕМЕННОГО РАСТВОРЕНИЯ UO_2 И ZrO_2 РАСПЛАВЛЕННЫМ ЦИРКАЛОЕМ

А.М. Святкин, В.В. Тихомиров, В.В. Яковлев, В.П. Смирнов
ГНЦ РФ НИИАР, г. Димитровград



На основе экспериментальных исследований, проведенных в НИИАР, оценены скорости растворения ZrO_2 и UO_2 расплавленным циркалоем при температурах 2100 и 2200°C. Разработана высокотемпературная установка для испытания образцов, проведены эксперименты и посттестовые исследования полученных композиций. Экспериментальные данные и расчетные данные кода СВЕЧА, представляющего модель деградации твэла водоохлаждаемого реактора при тяжелых авариях, не противоречат друг другу.

ВВЕДЕНИЕ

Для аварий с тяжелым повреждением топлива в реакторах с водяным охлаждением при потере теплоносителя характерно образование и стекание расплава конструкционных элементов ТВС [1]. Экспериментальная программа CORA позволила верифицировать интегральные расчетные коды, моделирующие поведение топлива легководных реакторов в условиях недостаточного охлаждения до начала плавления [2]. Однако кинетика взаимодействия материалов ТВС при более высоких температурах требует дополнительного экспериментального обоснования.

При потере теплоносителя в реакторах с водяным охлаждением происходит перегрев топлива, что становится причиной кипения остаточной воды и образования в топливной сборке пара. Этот процесс стимулирует интенсивное окисление внешней поверхности циркониевой оболочки твэла, образование слоя ZrO_2 . Дальнейший рост температуры вызывает плавление металлической части оболочки и взаимодействие расплава с наружным слоем ZrO_2 и топливной таблеткой UO_2 . Слой ZrO_2 представляет собой защитный чехол, препятствующий стеканию металлического расплава (U, Zr, O) вниз по поверхности оболочки. Таким образом, для расчетного моделирования поведения расплава важно определение условий разрушения слоя ZrO_2 в результате взаимодействия с жидким материалом оболочки в присутствии UO_2 .

В данной работе представлены экспериментальные результаты исследования кинетики одновременного растворения ZrO_2 и UO_2 расплавом необлученной оболочки при температуре 2100 и 2200°C.

Цель работы – оценка скорости растворения ZrO_2 и UO_2 жидким расплавом оболочки при совместных высокотемпературных испытаниях.

Основной задачей исследования является получение новой информации о процессе растворения UO_2 и ZrO_2 расплавленным циркалоем, ранее изучавшегося в

FZK (Германия) [3] и AECL (Канада) [4] в рамках 4-й Европейской рабочей программы проекта CIT. Результаты, полученные в этих организациях, показали, что кинетика одновременного растворения не может быть представлена как простая суперпозиция процессов растворения UO_2 –Zry, ZrO_2 –Zry. На этой стадии исследований было показано, что не происходит растворения ZrO_2 жидким циркалом при температуре 2000°C.

Для расширения базы экспериментальных данных, необходимых для создания расчетных программ, моделирующих эти процессы в реальных твэлах, в НИИАР проведено 14 экспериментов по одновременному растворению UO_2 и ZrO_2 расплавленным циркалом и выполнены посттестовые исследования в рамках 5-й Европейской рабочей программы международного проекта COLOSS. Работы проведены по контракту №18014-2001-06 F1SC ISP RU между НИИАР и JRC ISPRA (Италия).

В результате исследований после испытаний определены скорости растворения ZrO_2 и UO_2 жидким циркалом в определенной геометрии при температуре 2100 и 2200°C, которые вошли в экспериментальный массив данных, используемых в расчетном коде СВЕЧА, описывающем деградацию твэла.

Улучшенные модели совместного растворения ZrO_2 и UO_2 будут использованы в различных европейских кодах по тяжелым авариям, например, ICARE/CATHARE, и учтены на конечной стадии проекта COLOSS при пересмотре расчетов по АЭС ТМІ-2.

ПРОГРАММА РАБОТ

В экспериментах осуществлено растворение цилиндрического тигля из UO_2 (высота ~ 27,8 мм, диаметр ~ 26,5 мм, толщина стенки ~ 5 мм) и стержня из ZrO_2 (высота ~ 23,0 мм, диаметр ~ 8,0 мм), коаксиально расположенного внутри тигля, расплавленным циркалом, находящимся между UO_2 и ZrO_2 (рис. 1а). Проведены калибровочные эксперименты без установки в центральную часть UO_2 -тигля стержня из ZrO_2 (рис. 1б) для сопоставления условий экспериментов и результатов НИИАР с условиями и результатами ранее проведенных экспериментов [4]. На рис. 2 представлена схема установки для растворения ZrO_2 и UO_2 жидким циркалом.

Эксперименты проведены в вакуумной электронагреваемой печи в инертной среде (аргон) при температуре 2100 и 2200°C по следующему сценарию: медленный разогрев (< 1°C/с) до промежуточной температуры 1700°C, выход на рабочую температуру со скоростью 6°C/с, изотермическая выдержка и охлаждение. Температуру образца контролировали двумя W-Re термопарами и двухлучевым оптическим пирометром [5].

Серия экспериментов состояла из испытаний двух типов: с теплоизоляцией и без нее. Теплоизолирующий керамический материал располагался снизу и сверху тигля для ограничения теплопереноса в вертикальном направлении и снижения температурного градиента по радиусу тигля. Необходимо отметить, что в экспе-

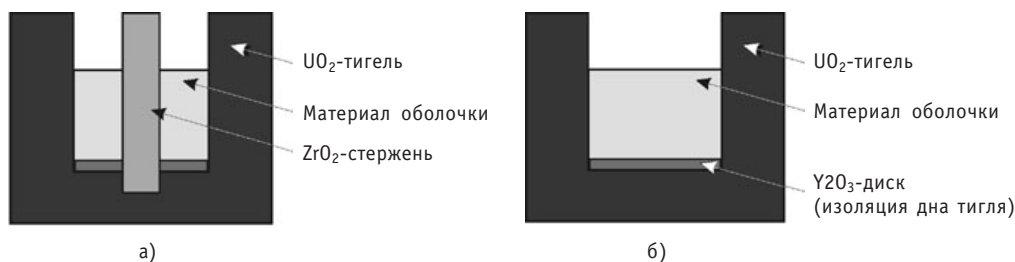
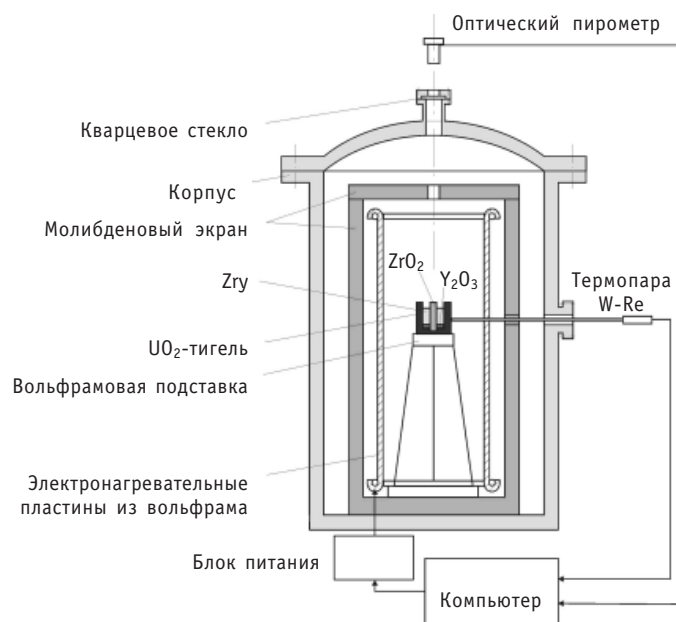


Рис. 1. Схема экспериментальных образцов для растворения UO_2 и ZrO_2 жидким расплавом оболочки: а – совместное растворение; б – растворение UO_2

Рис. 2. Схема установки для растворения UO_2 и ZrO_2 жидким расплавом оболочки

риментах без теплоизоляции температуру расплава контролировали пирометром. При наличии на образце теплоизоляционной «крышки» напрямую измерить температуру расплава не представлялось возможным. Поэтому, предположив, что в отсутствие излучения расплав имеет приблизительно такую же температуру, как внутренняя поверхность стенки тигля, в этих экспериментах контроль осуществляли по показаниям термопары, расположенной в отверстии глубиной около 4,5 мм, высверленном в стенке тигля на уровне иттриевого диска (толщина стенки около 5 мм).

Матрица проведенных экспериментов приведена в табл. 1.

Методы исследования. Для оценки скоростей растворения необходимо определение растворенных объемов UO_2 и ZrO_2 , распределения урана и циркония по радиусу тигля и содержания кислорода в расплаве. Поставленные задачи были решены с помощью оптической металлографии диаметральных сечений тигля и количественной обработки полученных изображений, а также химического анализа и электронной микроскопии расплава.

Подготовка образцов. После эксперимента были измерены наружный диаметр и высота каждого тигля, после чего тигли разрезали по образующей цилиндра

Таблица 1

Матрица экспериментов

Параметр	Тип испытания								
	Без теплоизоляции (контроль по пирометру)						С теплоизоляцией (контроль по внутренней термопаре)		
Температура испытаний, °C	2100								
Время выдержки, с	600*	100	200	300	400	500	600*	200	400
Температура испытаний, °C	2200								
Время выдержки, с	600*	100	180	260	180				

* – калибровочный эксперимент.

алмазным диском. Одну половину образца использовали далее для оптической металлографии и электронной микроскопии. Из второй половины вырезали образцы для химического анализа содержания урана, циркония и кислорода в расплаве.

Оптическая металлография. Образец, представлявший продольное сечение тигля, подвергали шлифовке и полировке, после чего на оптическом микроскопе были сделаны фотографии с увеличением в 5, 100 и 200 раз, использовавшиеся далее для количественного анализа степени растворения стенок тигля и центрального стержня.

Определение состава расплава методом количественной обработки изображений. Для определения растворенных объемов стенки тигля и центрального стержня методом количественного анализа изображений использовали фотографии продольных сечений образцов.

Растворенный объем тигля вычисляли как полусумму объемов V_1 и V_2 фигур вращения относительно оси тигля, образуемых площадями растворенных стенок тигля в сечении:

$$V_t = V_1 + V_2 ;$$

$$V_k = 1/2 \cdot s \cdot \pi \cdot \sum_i r_i ,$$

где s – элемент площади растворенной части тигля; i – номер элемента разбиения площади растворенной области k ; r_i – расстояние элемента площади до оси вращения; $k = 1, 2$.

Растворенный объем стержня из ZrO_2 вычисляли как разность объемов исходного стержня и его фрагментов, сохранившихся после эксперимента. Объем каждого сохранившегося фрагмента стержня вычисляли как усредненный объем фигуры вращения образованной оставшейся частью стержня относительно его оси по алгоритму, аналогичному описанному выше.

Массу элементов, перешедших в расплав в результате растворения материала стенок тигля и центрального стержня, рассчитывали как

$$M_i = V_t \rho_t m_i ,$$

где V_t – растворенный объем, ρ_t – плотность растворенного материала, m_i – массовая доля элемента в растворенном материале.

Массу расплава рассчитывали как сумму масс исходной загрузки циркалоя и масс элементов, перешедших в расплав из растворенных объемов стенки тигля и центрального стержня.

Электронная микроскопия. Для оценки равномерности распределения урана и циркония по сечению образца на растровом электронном микроскопе на полированных шлифах получены изображения образцов во вторичных электронах с увеличением в 200, 480 и 1200 раз, и проведено сканирование по радиусу в режиме волновой дисперсии с шагом 16 мкм.

Химический анализ расплава. Методика определения массовой доли урана, циркония и кислорода в затвердевшем расплаве основана на прокаливании образца при температуре 900–1000°C для окисления всех компонентов до состава стехиометрических оксидов U_3O_8 , ZrO_2 , Fe_2O_3 , CaO , Y_2O_3 , SnO_2 , Cr_2O_3 . Прокаленный образец взвешивали и обрабатывали азотной кислотой для избирательного растворения оксидов урана, железа, кальция и иттрия.

Массовые доли урана, циркония и кислорода рассчитывали исходя из первоначальной массы образца, массы окисленного образца и массы образца после обработки его азотной кислотой с учетом содержания в нем катионных примесей. Массовые доли катионных примесей определены спектрографическим методом.

Для проведения количественных расчетов использованы образцы сравнения, аналогичные по своему составу анализируемым.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

На рис. 3 представлены результаты испытаний тиглей с теплоизоляцией и без нее при температуре 2100°C с временем изотермической выдержки 400 с.

В экспериментах при температуре 2100°C «сквозного» растворения стенки тигля UO_2 не наблюдалось. При температуре 2200°C произошло проплавление стенки тигля UO_2 в калибровочном эксперименте с изотермической выдержкой 600 с и при одновременном растворении при изотермической выдержке 260 с.

В экспериментах с теплоизоляцией на стадии разогрева температурный градиент между расплавом и внешней поверхностью стенки тигля не превышает 45°C, тогда как без теплоизоляции он достигал 100°C. Степень растворения UO_2 и ZrO_2 в экспериментах с теплоизоляцией за счет уменьшения температурного градиента по радиусу образца ниже, чем при аналогичных параметрах в экспериментах без теплоизоляции.

На рис. 4 приведены изображения структуры расплава, полученные на электронном микроскопе, после испытаний при температуре 2100°C и времени изотермической выдержки 200 с с теплоизоляцией тигля.

Расплав имеет дендритную структуру с равномерным распределением фаз по объему образовавшегося слитка. От стенок тигля расплав отделен трещинами,

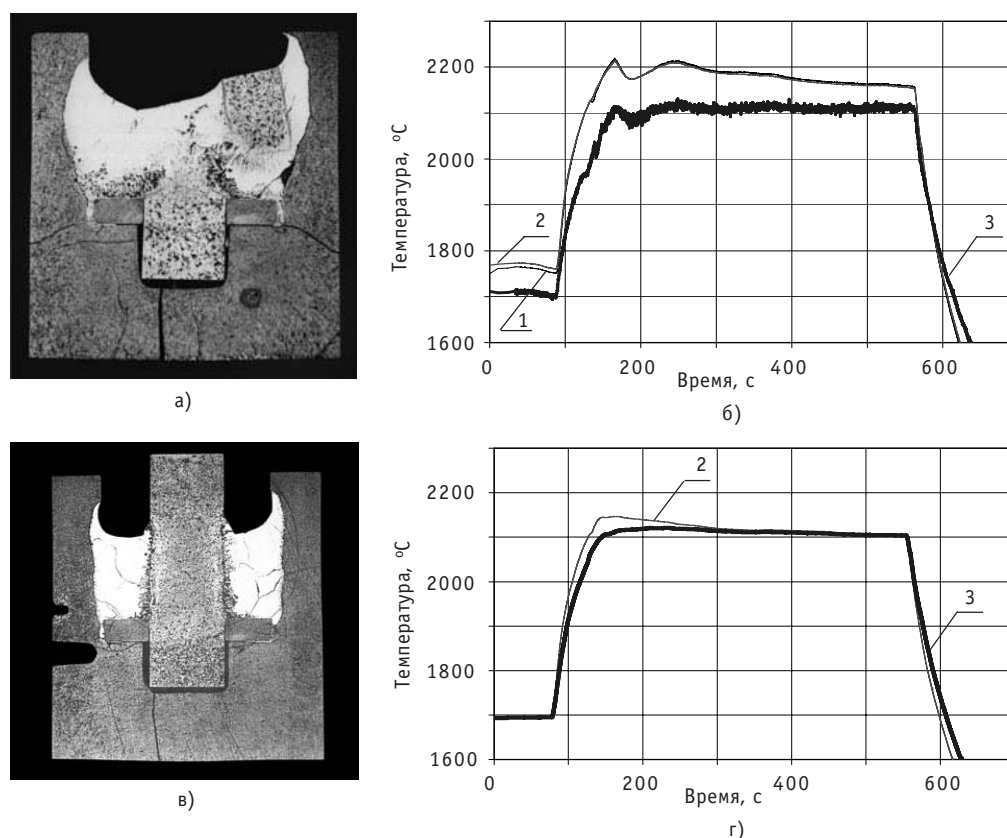


Рис. 3. Эксперименты при 2100°C с временем изотермической выдержки 400с: внешний вид тигля и режим испытания без теплоизоляции (а, б) и с теплоизоляцией (в, г): температура внешней поверхности тигля (1, 2) и расплава (3)

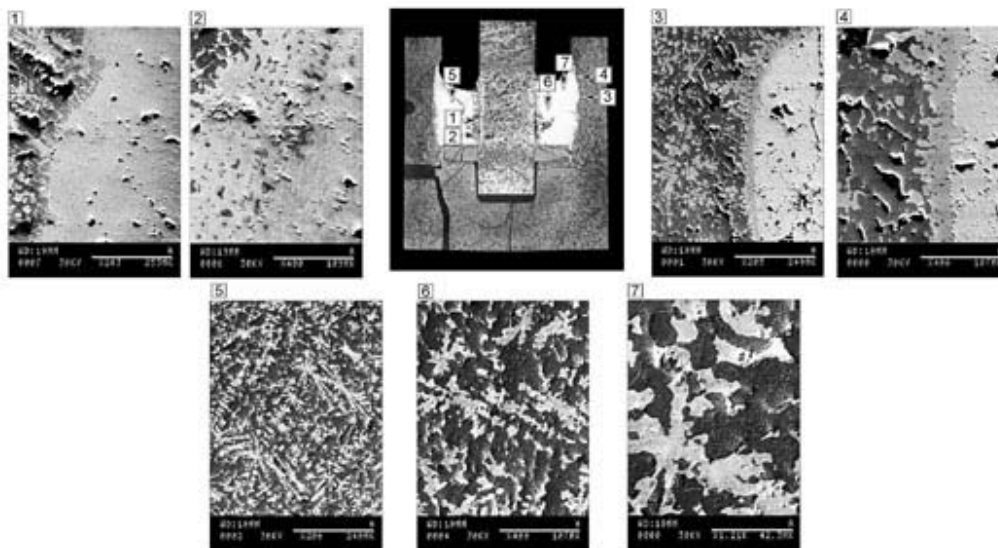


Рис. 4. Микроструктура образца после эксперимента 2100°C и времени изотермической выдержки 200 с при использовании теплоизоляции: область взаимодействия $ZrO_2 - Zr$ (1, 2); область взаимодействия $UO_2 - Zr$ (3,4); структура расплава (5, 6, 7)

образовавшимися в результате термической усадки сплава при охлаждении. Усадочные раковины наблюдаются преимущественно в центре нижней части слитка на месте растворенного стержня из диоксида циркония. В целом, структура образующегося расплава аналогична структуре, наблюдавшейся в ранее проведенных работах.

Анализ диаграмм сканирования в режиме волновой дисперсии позволяет сделать вывод об отсутствии градиента концентрации урана и циркония по радиусу исследованных слитков. Зоны резкого изменения концентрации урана и циркония в областях расплава, прилегающих к боковой стенке тигля и центральному стержню, имеют небольшую толщину около 70 мкм, что указывает на то, что потеря этих слоев при вырезке образцов для химического анализа не приводит к существенной ошибке в определении среднего значения элементного состава расплава.

ОБСУЖДЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Температурные измерения

Важнейшим параметром в исследовании совместного растворения ZrO_2 и UO_2 расплавом необлученной оболочки, непосредственно определяющим физику процесса, является температура металлического расплава (U, Zr, O). Достоверность измерений этой температуры позволяет корректно использовать получаемые результаты в математическом описании процесса. В рассматриваемом цикле экспериментов была осуществлена попытка измерять температуру расплава в динамике испытания напрямую с помощью оптического пирометра (дистанционно), в отличие от подобных экспериментов в работе [3, 4], где температура расплава оценивалась по показаниям ТЭП, располагавшейся над уровнем поверхности расплава на расстоянии ~ 20 мм.

Как было отмечено, температура расплава измерялась пирометром в серии экспериментов без использования теплоизоляции, и различие в показаниях пирометра и ТЭП, контролировавших температуру наружной поверхности стенки

тигля, в ряде случаев достигло 100°C. Такая величина ΔT не перекрывалась систематическими погрешностями измерительных приборов, составлявшими 1,5 и 1% от измеряемой величины для пирометра и ТЭП соответственно, что подтвердило существование предполагаемого значимого градиента температуры по радиусу образца между наружной поверхностью стенки тигля и расплавом.

В экспериментах с теплоизоляцией удалось установить, что градиент температуры по радиусу тигля не только снижается на стадии резкого разогрева (не более 45°C), но и после ~ 150 с выхода на заданный температурный режим практически исчезает, и значения температур областей, находящихся вблизи наружной и внутренней поверхности стенки тигля, в конце изотермического участка почти совпадают. Безусловно, неоднозначно утверждать, что температура расплава в конце изотермического участка в экспериментах с теплоизоляцией, а уж тем более без нее, где присутствует эффект потери тепла расплавом за счет излучения, будет такой же, как и температура наружной поверхности стенки тигля. Тем не менее, появились основания полагать, что различие в показаниях пирометра и ТЭП в конце изотермического участка в экспериментах без теплоизоляции не могло быть настолько велико. Таким образом, в нескольких экспериментах пирометр занижал истинные значения температуры расплава.

Причин, объясняющих занижение пирометром температуры расплава, может быть несколько. Во-первых, поверхность расплава, куда был сфокусирован пирометр, могла изменять свои отражающие способности из-за конвективного перемешивания компонентов и образования частиц второй фазы (керамическая фаза $(U,Zr)O_{2-x}$). Во-вторых, в течение эксперимента могла произойти расфокусировка пирометра, которая не регулировалась автоматически в процессе испытания. В-третьих, определенным образом могло сказаться влияние стержня ZrO_2 в случае падения в расплав его верхней части при полном растворении середины в область фокусировки пирометра.

Тем не менее, достоверность измерений ТЭП во всех проведенных экспериментах, не вызвала никаких сомнений. Хорошее совпадение показаний двух ТЭП зафиксировано в каждом эксперименте. Именно показания ТЭП использованы для интерпретации полученных экспериментальных результатов и учтены в расчетной модели кода СВЕЧА.

Характеристика исследованных композиций

Анализ результатов исследований композиций после цикла проведенных экспериментов подтвердил, что процесс совместного растворения ZrO_2 и UO_2 расплавом необлученной оболочки проходит в два этапа. Как и в предыдущих работах [3, 4] зафиксировано существование инкубационной фазы «насыщения», при которой происходит быстрое растворение диоксидов (до 100 с) за счет насыщения кислородом жидкого металлического расплава как за счет диффузии из твердых керамик, так и за счет интенсивного конвективного перемешивания компонентов. После ~100 с отмечено, что процесс растворения перешел во вторую послеинкубационную стадию «преципитации», характеризующуюся снижением скорости растворения диоксидов как за счет истощения запасов кислорода, способного диффундировать в расплав из керамик, так и главным образом за счет падения интенсивности конвективного перемешивания компонентов в результате увеличения вязкости расплава из-за формирования в нем частиц второй фазы керамики $(U, Zr)O_{2-x}$.

Структура застывшего расплава представляет собой дендриты, равномерно распределенные по объему матрицы композиции. Равномерность распределения фаз в расплаве подтверждена отсутствием градиента концентрации урана и цир-

кония по радиусу композиции. На одном из образцов проведена проверка фазового состава в расплаве после охлаждения, которая показала, что, как и в работах [3, 4], расплав состоит из трех основных фаз: дендритной керамической – $(U,Zr)O_{2-x}$; матрицы из $Zr(O)$; включений из $U(O)$ в керамике и в матрице.

Скорость роста количества кислорода в расплаве по результатам химического анализа, определяющего весь кислород, поступивший в расплав как за счет диффузии из керамик, так и за счет конвективного перемешивания, заметно снижается после ~ 150 с. Такая же тенденция наблюдается со скоростью роста количества кислорода, определенного методом количественной обработки изображений, что говорит о снижении диффузионного потока кислорода из тигля UO_2 и стержня ZrO_2 . Однако нельзя однозначно утверждать, что только уменьшение диффузионного потока ответственно за снижение скорости роста общего количества кислорода в расплаве. Безусловно, свой вклад в этот процесс вносит и уменьшение интенсивности конвективного перемешивания компонентов. Необходимо отметить, что в данной работе не рассматривалось влияние отдельно одного и другого механизма поступления кислорода в расплав на процесс растворения в целом, ввиду того, что, как уже упоминалось в работах по растворению тиглей UO_2 жидким расплавом оболочки [3, 4], эти явления уже изучены и найдена взаимосвязь этих механизмов с геометрическими параметрами исследуемых тиглей.

По результатам химического анализа и количественной обработки изображений проведено сравнение значений массового содержания урана и циркония в расплаве. Расчетные значения $U/(U+Zr)$ в расплаве, полученные двумя независимыми методами, хорошо совпадают, а также в пределах разброса данных согласуются с результатами ранее проведенных экспериментов (рис. 5).

Полученные в работе результаты как в экспериментах с теплоизоляцией, так и в экспериментах без нее использованы в расчетном коде СВЕЧА. На рис. 6 и 7 представлены результаты экспериментов с теплоизоляцией, в которых наиболее достоверно измерена температура расплава в сравнении с результатами расчета по коду СВЕЧА, выполненного специалистами ИБРАЭ [6].

Некоторое расхождение экспериментально полученных значений растворенных объемов UO_2 (вычислены методом количественного анализа изображений) при температуре 2100°C с результатами расчета, может быть связано с неточным

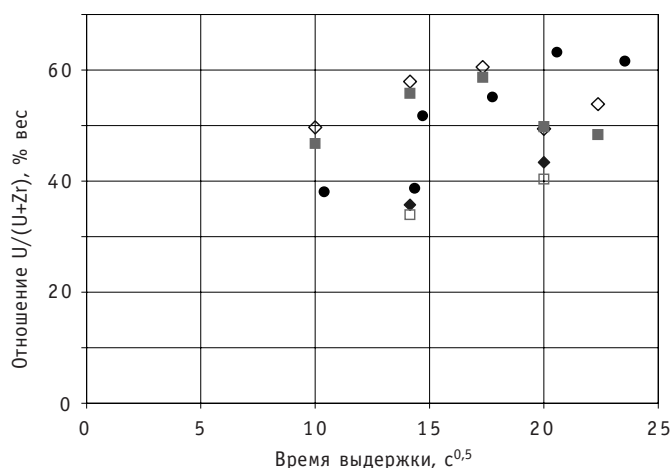


Рис. 5. Отношение содержания урана и циркония в расплаве в серии экспериментов при температуре 2100°C: \diamond – без теплоизоляции (обработка изображений); \blacksquare – без теплоизоляции (химический анализ); \blacklozenge – с теплоизоляцией (обработка изображений); \square – с теплоизоляцией (химический анализ); \bullet – эксперименты AECL без теплоизоляции

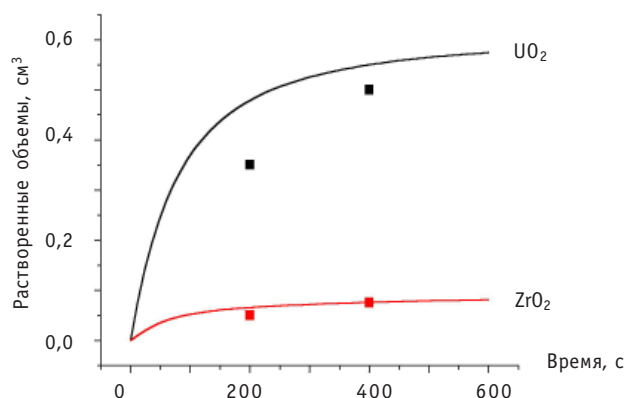


Рис. 6. Сравнение значений растворенных объемов ZrO_2 и UO_2 с результатами расчета по коду СВЕЧА при $T = 2100^\circ C$ [6]: ■ – эксперимент; — – расчет

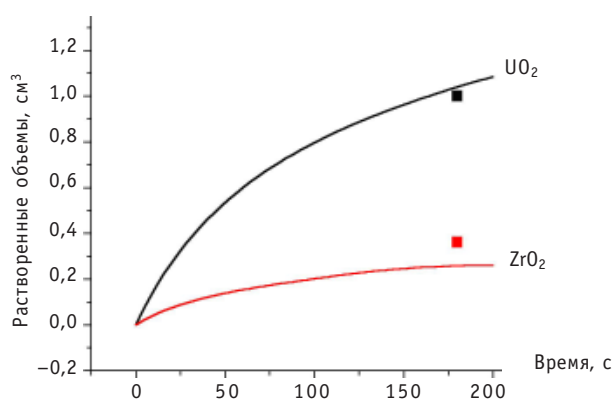


Рис. 7. Сравнение значений растворенных объемов ZrO_2 и UO_2 с результатами расчета по коду СВЕЧА при $T = 2200^\circ C$ [6]: ■ – эксперимент; — – расчет

попаданием анализируемого сечения в диаметрально плоскость тигля на стадии подготовки образцов, что привело к занижению значения растворенного объема UO_2 по сравнению с истинным.

Тем не менее, на основании представленного графика можно утверждать, что экспериментальные и расчетные данные не противоречат друг другу.

На рис. 8 представлено сравнение экспериментальных и расчетных значений

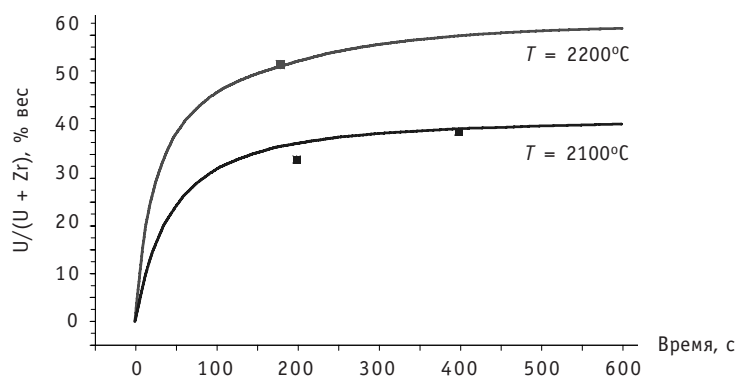


Рис. 8. Сравнение экспериментальных значений $U/(U+Zr)$ с результатами расчета по коду СВЕЧА [6]: ■ – эксперимент; — – расчет

отношения $U/(U+Zr)$, характеризующих скорости растворения диоксидов урана циркония при испытаниях с теплоизоляцией при температурах 2100°C и 2200°C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведено 14 экспериментов по исследованию одновременного растворения диоксидов урана и циркония расплавленным циркалом, три из которых являлись калибровочными.

2. Получены данные для определения скоростей растворения ZrO_2 и UO_2 жидким расплавом оболочки при температурах 2100 и 2200°C в совместных испытаниях.

3. Установлено, что при ускорении процесса растворения диоксидов урана и циркония расплавленным циркалом при температуре 2200°C происходит сквозное проплавление боковой стенки тигля при времени изотермической выдержки, превышающем 260с.

4. Результаты хорошо согласуются с данными по скорости растворения, полученными в AECL.

5. Показано, что уменьшение температурного градиента по радиусу тигля с помощью теплоизолирующей керамики на стадии разогрева образца вызывает снижение скорости растворения расплавленным циркалом диоксидов урана и циркония.

6. Экспериментальные данные и расчетные данные кода СВЕЧА не противоречат друг другу.

Литература

1. Hofmann P., Hagen S., Schanz G. and Skokan A. Reactor Core Materials Interactions at very high temperatures// Nuclear Technology. – 1989. – V. 87. – P.28-36.
2. International Standard Problem ISP-36 CORA-W2 Experiment on Severe Fuel Damage for a Russian Type PWR. Comparison Report, GRS. – Koln, 1995.
3. Hofmann P., Stuckert J., Miasoedov A., Veshchunov M., Berdyshev A., Boldyrev A. ZrO_2 Dissolution by Molten Zircaloy and cladding oxide shell failure. New experimental results and modelling. Wissenschaftliche Berichte ISSN 0947-8620, FZKA-6383, Karlsruhe, December 1999.
4. Hayward P., Hofmann P., Stuckert J., Veshchunov M., Berdyshev A. UO_2 Dissolution by Molten Zircaloy. New experimental results and modelling. Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6379, Karlsruhe, December 1999.
5. Святкин А.М. Установка и методы исследования растворения UO_2 и ZrO_2 расплавом оболочки/ Сборник рефератов и статей «Новые технологии для энергетики, промышленности и строительства». – Димитровград: ФГУП ГНЦ РФ НИИАР, 2002. – Вып. 5. – С. 294-301.
6. Muller K., Goryachev A. V., Smirnov V. P., Svyatkin A. M., Stuckert J., Veshchunov M. S., Berdyshev A. V. Simultaneous Dissolution of UO_2 and ZrO_2 by Molten Zircaloy. New Experiments and Modelling. Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6947, Karlsruhe, January 2004.

Поступила в редакцию 6.02.2007

enrichment process. These difficulties can become practically insuperable depending on ^{232}U concentration.

УДК 621.039.54

Exploring of Non-Wasted Fuel Cycle of the Ball-Poured Core of the Sodium-Cooled Fast Reactor \ G.B. Usynin, A.A. Kravchenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 6 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References – 4 titles.

The calculation of the non-wasted fuel cycle of the ball-poured fast reactor is presented. This fuel cycle contains two types of the reprocessing of the fuel – full and particular. By the full reprocessing pyroprocessing and other chemical operations are used. By the particular reprocessing, only physical and mechanical, and the part of the gas and flying fusion products are extracted.

УДК 621.039.543.6

The Input of an (α, n) Reaction Estimation to an Integral Neutron Intensities of WWER-1000 Spent Fuel \ I.V. Shamanin, M.E. Silaev, S.V. Bedenko, V.V. Martynov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 8 pages, 1 table, 3 illustrations. – References – 15 titles.

All nuclear processes resulting to neutron generation within a spent fuel are examined. Total neutron intensity per weight unit of WWER-1000 spent fuel caused by (α, n) reactions and spontaneous fissions of uranium and transuranium nucleus proceeding were determined. Inputs of (α, n) reactions to entire neutron intensity of WWER-1000 spent fuel was estimated according with his burn-up degree.

УДК 621.039.553.34

Analysis of Possible Types of Natural Convection Flows in a Closed Circuit \ Yu.M. Ashurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 11 pages, 7 illustrations. – References – 5 titles.

The paper is devoted to the analysis of the possible types and mechanisms of occurrence of natural convection flows of a single-phase incompressible liquid in a closed circuit. It has been shown that alongside of a common-circuit coolant natural circulation the local closed circuits of natural circulation can exist in some parts of the circuit. The conditions of occurrence of local natural circulation of the coolant in horizontal and vertical parts of the closed circuit and principles of a superposition of the common-circuit and local natural circulation are described.

УДК 621.039.534

Experimental Research of the Processes Accompanying Emergency Receipt of Organic Connections (oil) to the Lead-Bismuth and Lead Heat-Carrier \ A.V. Beznosov, I.V. Karatushina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 1 table, 6 illustrations.

Results of experimental and theoretical researches of the processes accompanying emergency receipt of organic connections – oil from the back sealing system of a shaft and circulating pumps bearings of lead-bismuth and lead heat-carrier power contours of nuclear reactors, thermonuclear reactors and accelerating-control systems are presented.

УДК 621.039.534

Results of Simultaneous Dissolution of UO_2 and ZrO_2 by Molten Zircaloy \ A.M. Svyatkin, V.V. Tikhomirov, V.V. Yakovlev, V.P. Smirnov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 1 table, 8 illustrations. – References – 6 titles.

Based on the experimental examination performed at RIAR rates of ZrO_2 and UO_2 dissolution by molten Zircaloy at 2100 and 2200°C were estimated. A high-temperature facility for specimen testing has been developed; experiments and post-testing examinations of the obtained compositions were carried out. The results were introduced into the experimental data array of the SVECHA calculation

code that is a model of degradation of a water-cooled reactor fuel rod under severe accidents.

УДК 621.039.5+519.85

Monte Carlo Precise Solution of Electron Transport Problem \ P.A. Androsenko, V.I. Belousov, A.G. Tsarina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 6 pages, 2 illustrations. – References – 8 titles.

The approach of the work is to consider questions of the semi-analytic Monte Carlo method application for the problems decision of charged particles deep transmission, and also albedo, in conditions of barrier geometry. Estimation recurrent formulas for building of the sampling process without simulating of the particles free path length are deduced that allow the researcher to solve problems of deep penetration by simulating of electrons transport with the individual collisions technique successfully. The results of calculations from new BRAND version code that based on developed algorithms are given.

УДК 621.039.5+519.85

Monte Carlo Simulation of Ionizing Radiation Influence on Chemical Composition of Human Tissues \ P.A. Androsenko, V.I. Belousov, A.G. Tsarina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 5 pages, 1 table, 1 illustration. – References – 4 titles.

The description and justification of the algorithm for modeling of radiation influence on tissue cells structure is developed on the basis of a statistical testing method. The main researched parameter is a dynamics of the concentration changes of free radicals and substances that are structural elements of cells. The received results agree well with theoretical and experimental data.

УДК 621.362

Universal mathematical model of electricity generation channel for heat, electrical and physical characteristics calculation \ D.G. Lazarenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 12 pages, 2 illustrations. – References – 16 titles.

Mathematical model of cylindrical geometry electricity generation channel for termionic reactor-converter for heat, electrical and physical characteristics calculation is considered. Proposed calculation method is suitable for multivariate calculations including optimization of output characteristics of electricity generation channels.

УДК 621.039.58

Mathematical Model of the Automated Technological Complex «Protection Object - Safety System» Function Process with Renewable Unit and Recurrent Control of Safety System \ A.I. Pereguda, D.A. Timashov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 9 pages, 2 illustrations. – References – 9 titles.

In the paper mathematical model of the automated technological complex «protection object - safety system» function process is proposed, in which system of scheduled recovery procedures is considered. The aim of this system is to provide safety operation of protection object. Cascade of integral equations was obtained and solved to calculate propability of complex crash on time interval $[0, t]$.

УДК 621.534:519.7

Scattering Problem for Model Potential of Fission for Heavy Nucleus and Program Systems in Applied Mathematical Programs \ A.V. Tikhonenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 5 tables, 8 illustrations. – References – 16 titles.

Models of two- and tree-peaked fission barriers for heavy nucleus are formulated and program systems are developed in order to obtain exact solutions for wave functions, calculate transmission