

ваны в виде отдельного модуля в составе программы MCU и апробированы при анализе смещения оценок коэффициента размножения и скорости реакции деления в выделенной регистрационной области полномасштабной активной зоны ВВЭР-1000, а также выборе одного из главных параметров расчета системы методом Монте-Карло — числа частиц в поколении.

Достоверная оценка систематических погрешностей позволяет повысить надежность результатов расчетов размножающих систем с использованием программ, реализующих метод Монте-Карло.

Формулы, приведенные в работе, универсальны и применимы при расчетах не только ВВЭР, но и любых других размножающих нейтроны систем (РБМК, PWR, BWR, хранилищ отработавшего ядерного топлива и др.).

Представленные в статье результаты получены в рамках выполнения НИР по проекту АЭС-2006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Майоров Л.В.** Оценки смещения результатов при расчете реакторов и хранилищ ядерного топлива методом

- Монте-Карло. — Атомная энергия, 2005, т. 99, вып. 4, с. 243—256.
2. **Свешников А.А.** Прикладные методы теории случайных функций. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Наука, 1968.
3. **Яглом А.М.** Корреляционная теория стационарных случайных функций (с примерами из метеорологии). Л.: Гидрометеиздат, 1981.
4. **Гомин Е.А.** Статус MCU-4. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2006, вып. 1, с. 6—32.
5. **Ермаков С.М., Михайлов Г.А.** Курс статистического моделирования. М.: Наука, 1976.
6. **Олейник Д., Калугин М., Сухино-Хоменко Е. и др.** Полномасштабная математическая модель переноса нейтронов в активной зоне реактора ВВЭР-1000, основанная на методе Монте-Карло и реализованная на многопроцессорных ЭВМ. Тезисы докл. 6-й Межд. научно-технич. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». ОКБ «Гидропресс», 26—29 мая 2009 г., с. 57.
7. **Калугин М.А., Олейник Д.С., Сухино-Хоменко Е.А.** Статистическая погрешность результатов расчетов реакторов методом Монте-Карло. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2010, вып. 4, с. 10—18.

Поступила в Редакцию 25.02.11

УДК 621.039.58

СРЕДНЕМАСШТАБНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ С ПОЛУЧЕНИЕМ ПРОТОТИПНОГО РАСПЛАВА МАССОЙ ~100 кг И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С БЕТОНОМ

Огородников В.А., Кондрашенко А.В., Мочалов М.А., Пелесков С.А., Андросов Ю.Н., Ерунов С.В., Пешков В.В., Бликов А.О. (РФЯЦ — ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.), Фунтиков А.И. (ОИВТ РАН, г. Москва)

Развитие крупномасштабной ядерной энергетики в XXI в. потребует более высокого уровня безопасности АЭС. Безопасность ядерной энергетической установки становится центральным вопросом. Несмотря на то что в системе средств и способов ее безопасности на первый план будет выдвигаться максимальное использование средств внутренней защищенности, по-прежнему актуальным является развитие внешних средств, в частности, ловушек расплава активной зоны, которые предотвратят распространение радионуклидов при крупной аварии, связанной с разрушением реактора.

В РФЯЦ — ВНИИЭФ в последние 20 лет среди многих направлений исследований можно особо выделить обоснование и реализацию воз-

можности моделирования соответствующих аварийных режимов ЯЭУ с помощью неядерных источников энергии: химических взрывчатых веществ, химически активных составов и др. [1]. Поскольку проведение аварийных экспериментов с ЯЭУ в натурных условиях невозможно, большинство исследований выполнено во вне-реакторных условиях и, как правило, в уменьшенных масштабах. Этим объясняется ограниченный объем экспериментальных данных о расплаве активной зоны, который представляет собой смесь расплава оксидного топлива и конструкционных материалов активной зоны при внутрикорпусной фазе аварии или еще более сложную систему, образующуюся после взаимодействия расплава со стальным корпусом

реактора и защитным бетоном за его пределами. То же относится и к взаимодействию расплава с разными конструкционными материалами, в том числе со строительным бетоном и огнеупорными материалами ловушек расплава. Кроме того, следует отметить, что предшествовавшие исследования проводились с использованием небольшого количества материалов, моделирующих поведение расплава на малых площадях взаимодействия с бетоном или конструкционными защитными керамическими материалами [2—10]. На результатах сказывалось влияние краевых эффектов, что затрудняло разработку адекватных замыкающих зависимостей в математических моделях и расчетных кодов для моделирования процессов взаимодействия.

Отмеченные обстоятельства послужили причиной проведения крупномасштабных экспериментов по взаимодействию расплава активной зоны реактора, в частности, с материалом шахты реактора — бетоном. Совместно со специалистами координационной экспертной группы Европейского союза CEG-SAM по рассмотрению методов защиты при тяжелых авариях АЭС были разработаны требования к постановке таких экспериментов:

в качестве модели ловушки используется цилиндрическая бетонная емкость с расплавом массой ~ 1 т и объемом ~ 100 л;

прототипный расплав должен состоять из UO_2 , ZrO_2 , Fe и до 10% продуктов разрушения бетона;

температура расплава $\sim 2700\text{—}3200$ К;

тепловые потоки к стенкам и дну бетонной емкости должны составлять $100\text{—}150$ кВт;

время взаимодействия расплава с бетоном $1\text{—}2$ ч.

В РФЯЦ — ВНИИЭФ разработан метод получения и удержания расплава, удовлетворяющий указанным требованиям. При отработке метода и проверке измерения параметров теплофизических процессов были проведены мало- и среднемасштабные эксперименты с расплавом массой 5, 30 и 100 кг. В настоящей статье приводятся результаты среднемасштабного эксперимента с массой прототипного расплава 100 кг.

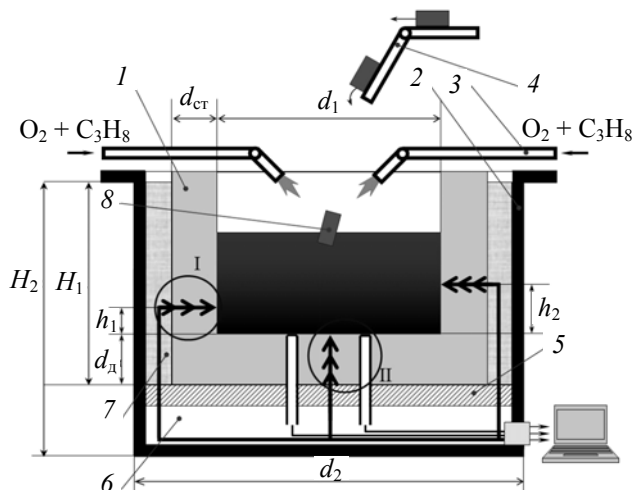
Экспериментальная установка. Принципиальная схема установки приведена на рис. 1. Ее параметры следующие:

Масса, кг:

исходного химически активного состава . . .	50
расплава . . .	100
брикета из химически активного состава . . .	0,72
Диаметр ванны расплава d_1 , см . . .	42
Бетонная емкость, см:	
высота H_1 . . .	58
толщина стенки $\Delta_{\text{ст}}$. . .	10
дна $\Delta_{\text{д}}$. . .	10
Установка, см:	
диаметр корпуса d_2 . . .	97
общая высота корпуса H_2 . . .	80

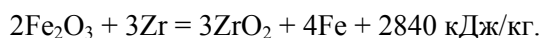
Цилиндрическую бетонную емкость 1 размещали в металлическом контейнере 2, в котором предварительно были установлены термопары и трубки вывода излучения пирометрических датчиков. Для их закрепления использовали диск из алюминиевого сплава 5, выводы термодпар и трубки к пирометрическим датчикам проходили через воздушную полость 6 и зазор 7 между бетонной емкостью и стенками металлического контейнера, заполненного силикатным песком. После закрепления датчиков заливали бетон. Состав бетона был близок к применяемому на некоторых европейских АЭС и состоял из следующих компонентов, % по массе: 25 SiO_2 , 41 CaO , 2 Al_2O_3 , 25 CO_2 и 3 H_2O . После заливки цилиндрическую емкость выдерживали в течение двух месяцев для окончательного затвердевания бетона. Эксперимент проводили во ВНИИЭФ на специальном полигоне для выполнения взрывных и опасных работ.

Проведение эксперимента. Для заполнения



Р и с. 1. Принципиальная схема установки получения расплава: 1 — бетонная емкость; 2 — стальной корпус; 3 — газовая горелка; 4 — система сброса брикетов из химически активного состава; 5 — диск из алюминия для закрепления термодпар; 6, 7 — зазоры между макетом и корпусом; I, II — группа датчиков в боковой и донной части бетонной емкости соответственно

бетонной емкости расплавом с обеспечением нужной температуры и тепловых потоков использовали известный химически активный состав, горение которого описывается реакцией



В крупномасштабном эксперименте с расплавом массой 1 т предполагается использование дополнительного количества химически активного состава, который горит согласно реакции $2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{U} = 3\text{UO}_2 + 4\text{Fe} + 1550 \text{ кДж/кг}$ и обеспечивает состав прототипного расплава $0,26\text{UO}_2 + 0,42\text{ZrO}_2 + 0,32\text{Fe}$.

Эксперимент начинался с инициирования горения порошкообразного химически активного состава массой 50 кг, помещенного в емкость. Скорость горения составляла 1 м/с. Через 40 с после начала горения в ванну с уже образовавшимся расплавом с интервалом 5—10 с сбрасывали прессованные брикеты того же состава массой 0,72 кг и плотностью $3,05 \text{ г/см}^3$ каждый. Это позволило увеличить массу расплава до 100 кг, а также поддерживать необходимую температуру в пределах 2700—3200 К и соответственно тепловые потоки на стенку и дно ловушки $100\text{—}150 \text{ кВт/м}^2$ на протяжении времени 480 с. Брикеты в расплав сбрасывали по изготовленному из стальной трубы диаметром 8 см, длиной 5 м желобу 4, расположенному под углом $\sim 30^\circ$ к оси емкости (см. рис. 1). Конец желоба находился на высоте 61 см над бетонной емкостью с расплавом, что позволило сбрасывать брикеты близко к центру емкости. Общее время с момента инициирования химически активного состава в бетонной емкости до сбрасывания последнего брикета составило 520 с.

Для компенсации теплового потока из ванны расплава вверх за счет излучения и конвективной теплопроводности и поддержания постоянной его температуры над поверхностью расплава располагали четыре газовые горелки 3, которые включали сразу после инициирования горения начального химически активного состава, расположенного в ловушке, и выключали в момент времени $\sim 1000 \text{ с}$.

Во время эксперимента проводилась киносъемка с помощью видеокамер в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Температуру на боковой стенке и дне бетонной емкости измеряли с помощью 34 хромель-алюмелевых термопар, двумя вольфрам-рениевыми термопарами определяли температу-

ру расплава вблизи дна емкости. Термопары изготавливали из проволоки диаметром 0,2 мм. Концы проволоки от места спая пропускали в двухканальную керамическую трубку, которую для защиты от повреждений при заливке бетона помещали в металлическую оболочку. Хромель-алюмелевые термопары использовали в комплексе с 4-канальными измерителями температуры CENTER-309, калиброванными до 1643 К. Аналогичный измеритель применяли для вольфрам-рениевой термопары, расположенной в центре дна бетонной емкости на границе с расплавом. В этом случае учитывали калибровочные зависимости термо-э.д.с. от температуры для термопар [11], коэффициент пересчета, на который были увеличены показания прибора, составлял $k = 2,55$. Другую вольфрам-рениевую термопару, установленную на той же границе на расстоянии 20 мм от центра, использовали в прямом режиме измерения термо-э.д.с. с калибровочной зависимостью.

Кроме того, к границе расплава на дне бетонной емкости на расстоянии 80 мм от ее центра подвели два пирометрических датчика, которые представляли собой стальные трубки диаметром 6 мм с закрепленными в них кварцевыми световодами диаметром 0,4 мм. Торцы трубки прикрывали колпачком из танталовой или молибденовой фольги толщиной 50 мкм. Расстояние от торца световода до фольги выбирали из условия, чтобы в поле зрения световода находилась вся поверхность фольги. Излучение с поверхности фольги регистрировали пирометром видимого диапазона спектра. В качестве фотоприемников использовали фотодиоды Hamamatsu S5971. Предварительно оптический тракт калибровали с помощью эталонной лампы СИРШ6-40 с яркостной температурой 1970 К, откалиброванной с помощью прецизионного пирометра ЭОП-66. При этом амплитуда сигналов, получаемых при освещении фотодиода излучением эталонной лампы, регистрировалась через оптические линии каналов, используемых в эксперименте.

Результаты эксперимента и обсуждение.

Киносъемка показала, что все брикеты из химически активного состава попадали в расплав и сгорали, в течение всего времени их сбрасывания твердая корка на поверхности не образовывалась. К моменту времени $\sim 1200 \text{ с}$ после начала эксперимента химически активный состав сго-

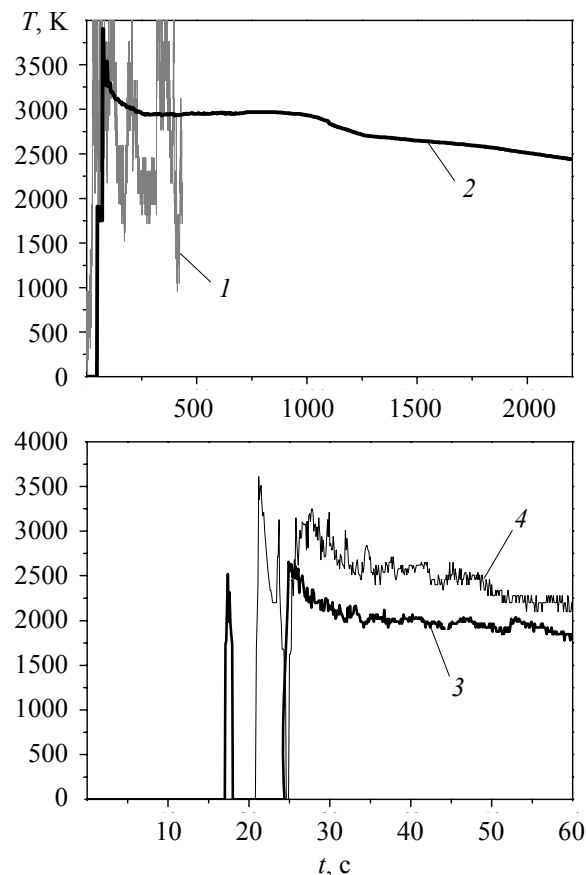
рал полностью, расплав остывал с образованием твердой фазы ZrO_2 , в которой наблюдались включения кипящей фазы железа. После полного остывания расплава по всей боковой внутренней поверхности бетонной емкости в результате брызг при падении брикетов образовался тонкий слой застывшего расплава толщиной 5—10 мм, что также свидетельствовало об отсутствии корки на поверхности во время эксперимента.

На дне и боковых стенках слитка застывшего расплава видны включения бетонных фракций. По результатам измерений установлено: масса слитка (с учетом включений бетонных фракций) составляет ~105 кг, диаметр ~45 см, высота ~16 см, что соответствует его средней плотности $\rho \sim 4,1 \text{ г/см}^3$, толщина стенки дна и боковой стенки бетонной емкости уменьшилась с 10 до 7 см и с 10 до 7,5 см соответственно. Масса застывшего на боковой стенке бетонной емкости тонкого слоя расплава составила 23 кг, около 2 кг расплава было выброшено в виде брызг и оказалось возле макета. Таким образом, общая масса продуктов химической реакции составила ~130 кг. Поскольку масса исходных реагентов составляла 103 кг (с учетом 1 кг алюминиевой фольги, в которую были завернуты сбрасываемые в расплав брикеты), масса разрушенного при абляции бетона примерно равна

27 кг, что соответствует уменьшению толщины стенки и дна бетонной емкости с учетом исходной плотности бетона ($\rho = 2,7\text{—}2,9 \text{ г/см}^3$). Таким образом, в слитке расплава содержатся компоненты терморазложения бетона. По виду поверхности разреза слитка можно заключить, что распределение железа, диоксида циркония и продуктов деструкции бетона равномерное.

На рис. 2 приведены результаты измерения температуры на границе между расплавом и дном бетонной емкости, полученные с помощью вольфрам-рениевых термопар (1, 2) и пирометрических датчиков. На рис. 3 представлены временные зависимости температуры, которые получены с помощью хромель-алюмелевых термопар, установленных на дне и в стенке бетонной емкости на расстоянии от 5 до 30 мм от границы с расплавом.

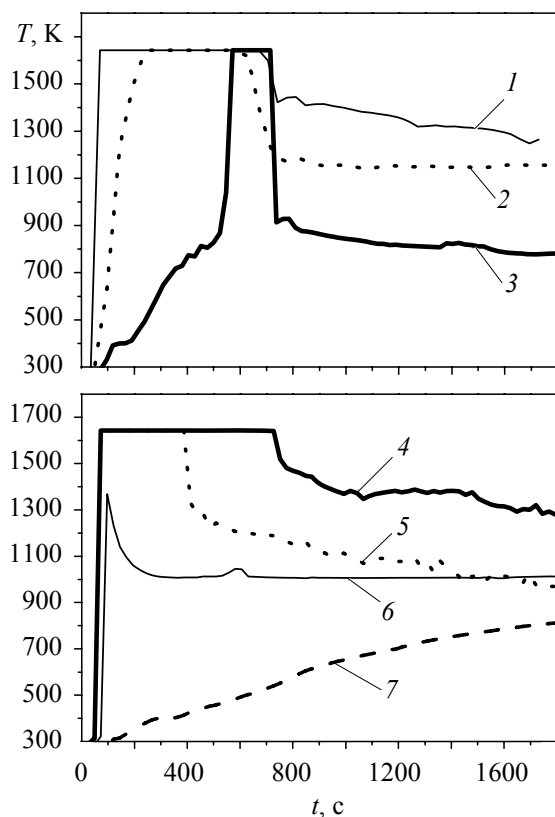
Из полученных данных следует, что температура расплава на дне бетонной емкости в течение всего эксперимента составляла 2600—



Р и с. 2. Температура расплава, измеренная с помощью вольфрам-рениевых термопар (1, 2) и пирометрического датчика с молибденовым (3) и танталовым экраном (4)

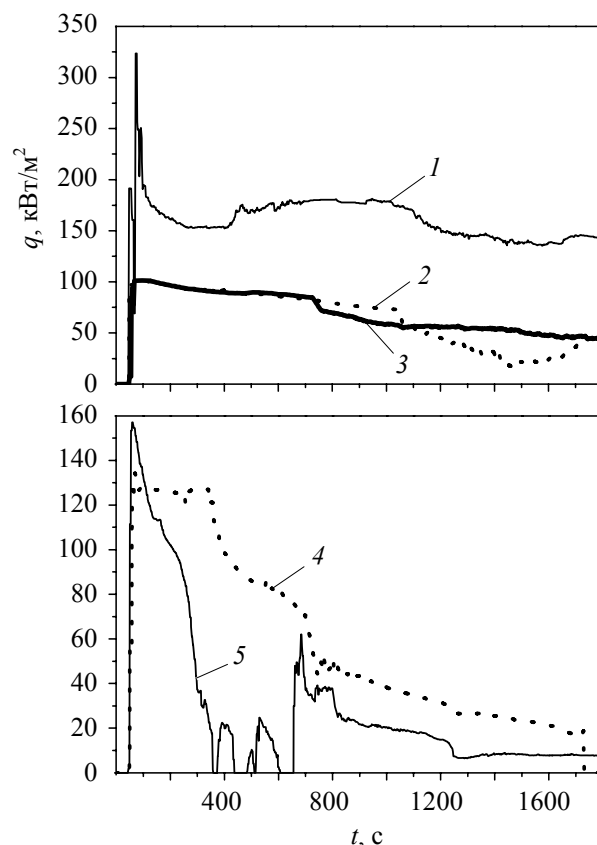
2800 К. При этом значения температуры, измеренной разными методами, непротиворечивы и их можно использовать для оценки тепловых потоков на дно и стенку бетонной емкости. Ограничение температуры, которая измерена хромель-алюмелевыми термопарами, установленными в бетоне на расстоянии 5—10 мм от поверхности расплава, 1643 К связано с их калибровкой и установкой на эту температуру. Поэтому в крупномасштабных экспериментах следует использовать в основном вольфрам-рениевые термопары и пирометрические датчики, время жизни которых можно увеличить применением защитных трубок из более высокотемпературных материалов, в частности, из диоксида циркония.

Совокупность температурных зависимостей от времени $T(t)$, зарегистрированных на разных расстояниях от границы с расплавом, позволяет оценить тепловые потоки на дно и стенки бетонной емкости. Следует отметить, что эти оценки являются приближенными, поскольку полученные градиенты температуры соответ-



Р и с. 3. Температура в стенке бетонной емкости на высоте 40 мм от дна на расстоянии 5 (1), 15 (2), 25 мм (3) от границы расплава и на дне на расстоянии 10 (4), 15 (5), 20 (6), 30 мм (7) от границы расплава

вуют области сложной структуры расплав—буферная зона—бетон с неизвестным коэффициентом теплопроводности. По-видимому, из всех составляющих в этой области наименьший коэффициент теплопроводности имеет неразрушенный бетон. Поэтому тепловые потоки с коэффициентом теплопроводности бетона отвечают заниженным оценкам. При расчете тепловых потоков на дно и стенки бетонной емкости принималось $\lambda = 1,7$ и $1,5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ с учетом температуры посередине между термопарами 1500 и 1000 К соответственно [12]. На рис. 4 приведены полученные зависимости тепловых потоков от времени на дно и стенки бетонной емкости. С учетом абляции бетона, составившей 3 и 2,5 см на дно и стенки емкости соответственно, и хода температурных зависимостей, представленных на рис. 2, 3, можно приблизительно оценить скорость абляции. Если полагать, что абляция бетона проходила за 20—30 мин, тогда ее скорость должна составлять $\sim 0,1 \text{ см/мин}$, что не противоречит, в частности, результатам работ [10, 13].



Р и с. 4. Расчетный тепловой поток в дно на расстоянии 15 (1), 20 мм (2, 3) и стенки бетонной емкости на расстоянии 15, высоте 40 (4), 55 мм (5) от границы расплава

Таким образом, среднемасштабный эксперимент показал возможность использования апробированной технологии получения прототипного расплава в крупномасштабном эксперименте.

Вопрос о возможности крупномасштабного моделирования взаимодействия расплавленного материала, вытекающего из реактора при гипотетической критической аварии, с материалами ловушки, размещенной под реактором, был поставлен В.Н. Минеевым. Обсуждение деталей такого эксперимента проводилось также с его участием, однако сам эксперимент удалось осуществить только после его смерти.

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ № 3831.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трутнев Ю.А., Соловьев В.П. Работы ВНИИЭФ по безопасности атомной энергетики. — В сб.: III сессия школы-семинара «Экологическая и промышленная безопасность». Саров, ВНИИЭФ, 2004, с. 45—48.
2. Бакунов О.В., Боровкова Л.Б., Крищенко Л.П. и др. Взаимодействие диоксидциркониевого бетона гидрата-

- ционного твердения с металлическими расплавами. — Огнеупоры, 1995, № 11, с. 2—7.
3. **Акопов Ф.А., Бородин Т.И., Вильяно Г.Е. и др.** Взаимодействие металлических компонентов расплава активной зоны реактора с диоксидциркониевой керамикой. — Атомная энергия, 1995, т. 79, вып. 6, с. 454—458.
 4. **Бешта С.В., Витоль С.А., Крушинов Е.В. и др.** Исследование взаимодействия расплава корнума с перспективными материалами ловушки расплава. — В сб.: Межд. конф. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР», т. 2. Обнинск, 1995, с. 184.
 5. **Акопов Ф.А., Акоюн А.А., Барыкин Б.М. и др.** Взаимодействие компонентов расплава с диоксидциркониевой керамикой. — Атомная энергия, 1998, т. 84, вып. 4, с. 318—322.
 6. **Акопов Ф.А., Акоюн А.А., Барыкин Б.М. и др.** Поведение диоксидциркониевой керамики плазменного напыления при термохимическом воздействии на нее компонентов расплава активной зоны. — Там же, т. 85, вып. 2, с. 115—119.
 7. **Farmer M., Spencer B., Binder J.** Status and future direction of the melt attack and coolability experiments (MACE) program at Argonne National Laboratory. — In: 9th Intern. Conf. on Nuclear Engineering ICONE 9. Nice, France, 8—12 Apr., 2001, ICONE 9696, p. 1—4.
 8. **Nitheanandan T.** Development of Molten Corium Using an Exothermic Chemical Reaction for the MFMI Studies at Chalk River Laboratories. ICAPP, Pittsburgh, 2004.
 9. **Mwamba K., Piluso P., Eyries D. e.a.** Self-propagating high-temperature synthesis of a nuclear reactor core melt for safety experiments. — In: VIII Intern. Symp. Self-Propagating High-Temperature Synthesis SHS2005. Cagliari, Italy, 2005, p. 75—79.
 10. **Жданов В.С.** Взаимодействие расплава активной зоны с материалами реакторной установки в проблеме тяжелой аварии ВВЭР. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Санкт-Петербург, Политехнический ун-т, 2008.
 11. **Датчики** теплофизических и механических параметров. Справочник. Т. 1. М.: Радиотехника, 1998.
 12. **Чиркин В.С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. М.: Атомиздат, 1968.
 13. **Минеев В.Н., Боровкова Л.Б., Акопов Ф.А. и др.** Внешняя ловушка из керамики и бетона на основе диоксида циркония. — Атомная энергия, 1998, т. 85, вып. 2, с. 119—125.

Поступила в Редакцию 5.04.11

УДК 669.295+669.296+669.297

ВЫСОКОЧИСТЫЕ ТИТАН, ЦИРКОНИЙ И ГАФНИЙ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

*Коцарь М.Л., Лавриков С.А., Никонов В.И. (ОАО «ВНИИХТ», г. Москва),
Александров А.В., Ахтонов С.Г. (ОАО ЧМЗ, г. Глазов), Александров А.В. (ЗАО МГА «Титан», г. Москва)*

В настоящее время созданы предпосылки для внедрения высокоэффективных топливных циклов на действующих АЭС с ВВЭР. Внедрение таких циклов сопровождается увеличением длительности эксплуатации, повышением выгорания топлива и паросодержания теплоносителя, ростом температуры оболочек и напряжений в них. Ресурс и безопасность ядерных реакторов определяют конструкционные материалы. В ядерной энергетике в качестве конструкционных и поглощающих материалов реакторов на медленных нейтронах широко применяются титан, цирконий, гафний и сплавы на их основе.

Титан и его сплавы используются в трубах теплообменного оборудования ВВЭР и РБМК (ВТ1-00, ВТ1-0, ПТ-1М, ПТ-7М), парогенераторов ВВЭР-1000 (ВТ1-0) и транспортных реакторов (ПТ-7М), питающих трубах и коллекторах транспортных установок (ПТ-7М), деталях внутреннего насыщения трубных систем транспортных установок (ВТ1-0, 3М, ПТ-3В), лопатках турбоустановок (ПТ-3В, ВТ-6). Сплав титана с

20% циркония (РК-20) является перспективным материалом для изготовления корпусов ВВЭР. Химический состав сплавов титана, применяемых в энергетическом оборудовании ЯЭУ, приведен в табл. 1.

Выход из строя титановых изделий энергетического оборудования АЭС происходит в том числе из-за трещинообразования вследствие гидрирования (наводороживания) титана и его сплавов при достижении массовой доли водорода ~0,06% (атомной доли водорода ~2,8% или массовой доли TiH_2 1,5%). Наличие водорода уже в слитках титана при массовой доле более $6 \cdot 10^{-3}\%$ (атомной доле 0,284%) может приводить к образованию гидридных прослоек по границам зерен и потере пластичности [3].

Одна из причин ускоренного гидрирования титана и его сплавов заключается в недостаточно чистой основе титана и использовании легирующих добавок (V, Mn, Mo), способствующих интенсификации этого процесса. В соответствии с ГОСТом 19807—91 массовая доля примесей в