

селка не была учтена радиоэкологическая ситуация, в результате чего жилые здания оказались построенными на участках с повышенным радоновыделением из грунтов. Это привело к поступлению радона в здания и созданию крайне высокой его концентрации, превышающей санитарные нормы в воздухе жилых помещений в сотни, а иногда и в тысячи раз.

Выводы. Месторождения полезных ископаемых, содержащие в качестве основных или примесных компонентов естественные радионуклиды (даже не в промышленной концентрации), могут при их освоении создавать радиационно опасную обстановку для населения близлежащих поселков за счет радиоактивных сбросов в водную систему, выбросов в атмосферу и поступления радона в жилые помещения. Эта опасность особенно велика при неправильно установленной санитарно-защитной зоне, радиологически необоснованном землеотводе или неконтролируемом применении отходов производства при строительстве. Используемая нами технология и аппаратура позволяет исследовать распределение радиоактивных сбросов и выбросов на разведываемых и эксплуатируемых месторождениях полезных ископаемых. Опыт, приобретенный при обследовании радиационной опасности на территории АО Ковдорский горно-обогатительный комбинат, разведочном участке Белая Зима и других объектах народного хозяйства и частично отраженный в настоящей работе, может быть использован и на других месторождениях, в которых естественные радионуклиды присутствуют в виде основных или сопутствующих компонентов. При этом, однако, необходимо применять высокоточные методы и аппаратуру, позволяющие проводить измерения с миллиграммовыми навесками анализируемых проб, в частности, был использован лазерно-люминесцентный метод анализа урана в пробах.

Необходима разработка и утверждение нормативных документов по оценке радиационной опасности месторождений полезных ископаемых для охраны здоровья населения и предотвращения неоправданной радиофобии, зачастую приносящей больший вред здоровью населения, чем само воздействие естественных радионуклидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сборник законодательных, нормативных и методических документов для экспертизы воздухоохраных мероприятий. Л.: Гидрометеоздат, 1996.
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ-96). М.: ИИЦ Госкомсанэпиднадзора России, 1996.
3. Соколов А.К., Соколов М.М., Титов В.К. Определение микроколичеств урана по люминесценции, возбужденной лазерным излучением. — Журн. аналит. химии, 1982, № 8, с. 1466—1468.
4. Титов В.К., Лашков Б.П., Черник Д.А. Экспрессные определения радона в почвах и зданиях. СПб, ВИРГ, 1992. 40 с.
5. Черник Д.А., Фоминых В.И., Венков В.А., Титов В.К. Экспресс-метод для измерений эквивалентной равновесной объемной активности радона. — Рос. геофиз. журн., 1994, № 3—4, с. 85—89.

Поступила в Редакцию 8.08.97

УДК 621.039.586

ПОВЕДЕНИЕ БАССЕЙНА РАСПЛАВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ В ДНИЩЕ КОРПУСА РЕАКТОРА (ПРОЕКТ «Расплав»)

Асмолов В.Г., Абалин С.С., Дегальцев Ю.Г., Шах О.Я.

(РНЦ «Курчатовский ин-т»),

Дьяков Е.К. (НПО «Луч»), Стрижов В.Ф. (ИБРАЭ РАН)

В статье представлены основные направления работ и результаты, полученные в ходе исследований по первой фазе проекта «Расплав». Работы по проекту проводились РНЦ «Курчатовский ин-т» совместно с несколькими научными и научно-производст-

венными организациями России: ИБРАЭ РАН, НПО «Луч», НПО «Электротерм», НПО «Термикс» и др. Проект «Расплав» был инициирован ОЭСР в 1994 г. как трехлетняя программа исследования поведения бассейна расплава прототипных материалов активной зоны в днище корпуса реактора. Задолго до начала проекта в 1989 г. РНЦ «Курчатовский ин-т» предложил начать совместные исследования по этой проблеме. Двухстороннее исследовательское соглашение между Комиссией по ядерному регулированию США и РНЦ «Курчатовский ин-т» являлось первым шагом в реализации проекта. В серии маломасштабных экспериментов исследовали взаимодействие расплава активной зоны с различными материалами. Данные, полученные во время этой фазы, позволили получить опыт обращения с высокотемпературными материалами активной зоны в лабораторных условиях. Параллельно начались расчетно-теоретические исследования, ведущую роль в которых играл ИБРАЭ РАН.

На основе исследований были разработаны предложения для ОЭСР по организации проекта, который был представлен странам-участникам в 1992 г. Интенсивные дискуссии с экспертами стран ОЭСР позволили ясно сформулировать основные цели проекта, технические подходы и ожидаемые результаты. Соглашение о проекте ОЭСР для исследования взаимодействия расплава топлива с днищем корпуса реактора было подготовлено и подписано между странами-участницами проекта и Россией в июле 1994 г. В проекте, который впервые проводился в стране, не входящей в ОЭСР, объединили свои усилия 14 стран и Россия (позднее в 1996 г. к нему присоединились Чехия и Венгрия). Исполнителем определен РНЦ «Курчатовский ин-т».

Главной целью проекта «Расплав» было исследование процессов, проходящих на той стадии тяжелой аварии, когда после расплавления и стекания активной зоны на днище корпуса образуется бассейн расплава. Такой сценарий реализовался во время аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» в 1979 г. Во время этой аварии расплав активной зоны переместился на днище корпуса, разрушение которого было предотвращено подачей дополнительной воды в реактор, что способствовало охлаждению бассейна расплава [1]. Поэтому охлаждение расплава на днище корпуса является одной из важных проблем при разработке процедур управления авариями, включая внешнее охлаждение корпуса реактора снаружи [2, 3].

При рассмотрении процессов охлаждения наиболее важное значение имеет теплогидродинамика расплава, теплопередача к воде и механическое поведение корпуса при определенных тепловых нагрузках. Основой понимания тепломассопереноса в расплаве являются экспериментальные результаты, полученные с использованием моделирующих жидкостей, воды и фреона [4–6], однако накопленных знаний недостаточно для обоснования удержания расплава на днище корпуса. Особенностью имитатора расплава активной зоны по сравнению с моделирующими жидкостями является его многокомпонентность, разница в температуре плавления компонентов, образование корок вблизи охлаждаемых границ. В предельном случае возможны два состояния бассейна, соответствующие различным режимам теплопереноса в расплаве: установившийся режим конвекции жидкого расплава и перенос за счет теплопроводности при отсутствии циркуляции. Чисто теплопроводностный режим теплопередачи может возникать, например, при раздельном переносе различных компонентов расплава в гравитационном поле или вследствие охлаждения, приводящих в конечном итоге к их разделению. Нарушение конвекции прежде всего скажется на охлаждении нижней части днища, где критический тепловой поток минимален [3, 7]. Все сказанное предопределило необходимость проведения экспериментов с прототипными материалами активной зоны, направленных на выявление особенностей поведения расплава в условиях охлаждения. Их результаты должны подтвердить или опровергнуть применение результатов экспериментов с моделирующими жидкостями и моделей, разработанных на их основе, к реальной ситуации. На решение этих задач и направлен проект «Расплав», главные цели которого состоят в проведении:

крупномасштабных экспериментов по исследованию поведения расплава прототипных материалов активной зоны на днище корпуса, определении главных отличий по сравнению с моделирующими жидкостями;

маломасштабных экспериментов для выявления основных закономерностей поведения расплава при высокой температуре и определении основных теплофизических свойств, необходимых для анализа экспериментов;

экспериментов на солевых расплавах для исследования процессов теплопередачи и обоснования методики крупномасштабных экспериментов;

разработке расчетных моделей и программ для анализа и интерпретации результатов крупномасштабных и поддерживающих экспериментов.

Изучение возможности технической реализации экспериментальной секции проекта. До начала проекта «Расплав» фактически не было данных о свойствах смесей материалов активной зоны, содержащих диоксид урана, циркония и металлический цирконий. Не было конструкционных материалов для создания интегральной установки, способных удерживать высокотемпературный и химически агрессивный расплав внутри экспериментальной секции при прототипных и контролируемых условиях. Поэтому в течение первого года работы по проекту исследовалась возможность проведения крупномасштабного эксперимента, включая разработку экспериментальной методологии, систем диагностики, конструкционных материалов и методов их защиты от опасных взаимодействий. В серии лабораторных и маломасштабных экспериментов потребовалось разрешить важные технические проблемы, в том числе:

определить конструкцию экспериментального устройства, достаточно прототипную, с одной стороны, и позволяющую нагреть и удерживать расплав в течение длительного времени, с другой;

развить методы нагрева материалов активной зоны до температуры, превышающей температуру ликвидуса ($T > 2400^\circ\text{C}$);

разработать систему совместимых материалов, способных выстоять в экстремальных условиях эксперимента;

удержать расплав в объеме экспериментальной секции;

развить технику проведения измерений в области температуры, превышающей 2500°C .

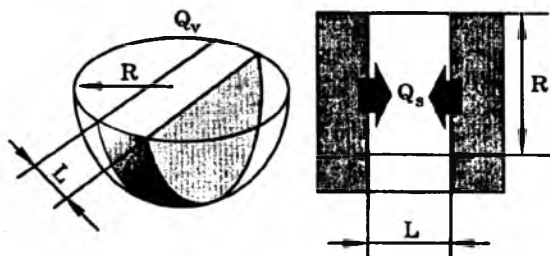
Масштаб экспериментальных усилий на этой стадии проекта суммирован в табл. 1. Кроме того, здесь же необходимо было определить состав расплава для крупномасштабных экспериментов.

Т а б л и ц а 1. Матрица экспериментов, проведенных до крупномасштабных тестов, и их основные параметры

Эксперимент (серия)	Цель	Загрузка			Число экспериментов
		композиция	масса, кг	максимальная температура, $^\circ\text{C}$	
Лабораторные эксперименты («Тигель», «Корпус», «Терек», «Тюльпан»)	Изучение свойств материалов, их взаимодействия	C-22, C-50, C-100	До 5	3000	> 100
«Расплав-A-liq»	Возможность перелива расплава	C-22	12	2900	13
«Расплав-AW-2,5»	Возможность стеночного нагрева	C-22	12	2450	1
«Расплав-AD-2,5»	Возможность объемного нагрева	C-100	40	> 2600	1

Отсутствие расчетных программ до начала проекта не позволяло провести адекватный анализ установки, предтестовые расчеты и расчеты реальной аварии коммерческого реактора. Поэтому одновременно развивались программные средства для анализа и интерпретации результатов экспериментов.

Ключевой проблемой до проведения крупномасштабного эксперимента являлся вопрос о геометрии и методе нагрева, моделирующего остаточное тепловыделение. Были рассмотрены две возможности: проведение экспериментов в полусферической геометрии с прямым пропусканием тока через расплав и плоской (так называемой «слайс»-геометрии) с использованием методов прямого пропускания тока или стеночного нагрева (рис. 1).



Р и с. 1. Переход к экспериментальной секции с плоской геометрией и стеночным нагревом

Сравнительные аналитические и расчетные исследования естественной конвекции, вызываемой объемным и стеночным нагревом, показали, что безразмерные числа, характеризующие теплопередачу, являются достаточно близкими. Впоследствии прямые экспериментальные исследования на солевой установке доказали их близость и продемонстрировали возможность использования стеночного нагрева в крупномасштабном эксперименте.

При реализации обоих методов в эксперименте каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Полусферическая геометрия является более прототипной, но при этом возможен только прямой нагрев пропусканием электрического тока. Кроме того, в этом случае возникает существенная неоднородность тепловыделения, электромагнитные силы Лоренца искажают естественную циркуляцию расплава. Второй метод требует использования совместимых конструкционных материалов. Для экспериментальной проверки обоих методов были проведены два эксперимента. Эксперимент «Расплав-AW-1:2,5», выполненный в масштабе 1:2,5 по отношению к крупномасштабному эксперименту в феврале 1995 г., показал возможность применения плоской геометрии и стеночного нагрева. Возможность прямого нагрева расплава, как показал второй эксперимент «Расплав-AD-1:2,5» в августе 1995 г., ограничена его высокой электропроводностью. В итоге вместе с большим числом поддерживающих расчетов был сделан выбор в пользу стеночного нагрева в плоской геометрии, причем стало ясно, что для успешного проведения крупномасштабного эксперимента необходим значительный перегрев расплава ($\sim 200^\circ\text{C}$) по отношению к температуре ликвидуса.

Необходимость достижения экстремальных параметров потребовала разработать уникальные конструкционные и защитные материалы. В результате множества лабораторных экспериментов была подобрана необходимая комбинация защитных материалов, состоящая из вольфрамового протектора, танталового субпротектора и боковых графитовых плит, нагреваемых индукционным методом. Совместимость этих материалов до температуры 2720°C была подтверждена экспериментами на установке «Тюльпан», позволяющей проводить материаловедческие исследования в больших масштабах. Одновременно в этом температурном диапазоне была протестирована система диагностики.

Выбор состава расплава подробно обсуждался. Расплав, обнаруженный на днище корпуса после аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд», состоял в основном из оксидных фаз с небольшим количеством металлических компонентов (состав C-100, табл. 2). Однако для первого эксперимента был выбран состав C-22, содержащий значительное количество металлического циркония. Причина такого выбора состояла, с одной стороны, в том, что этот состав имеет более низкую температуру ликвидуса, с другой,

более высокую теплопроводность по сравнению с другими исследованными составами. Кроме того, разница между температурой солидуса и ликвидуса для состава С-22 равна 500 °С, тогда как для С-100 всего около 50 °С.

Т а б л и ц а 2. Матрица измерений свойств загрузки

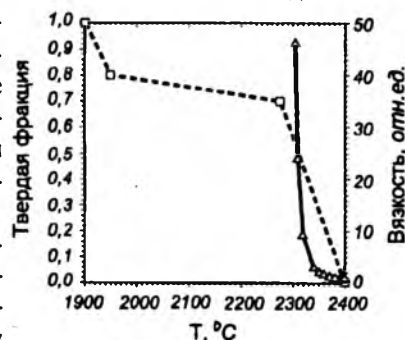
Композиция	Состав, % по массе			До температуры, К		
	UO ₂	ZrO ₂	Zr	электропроводность	вязкость	теплопроводность
С-22	81,5	5	13,5	2890	2970	3150
С-50	80	11,5	8,5	2840	Не проводились	Не проводились
С-100	77,8	22,2	—	3070	3070	3150

Предполагалось, что это различие может достаточно сильно влиять на гидродинамическое поведение «кашесобразного» расплава, поскольку в этой зоне присутствие твердой фазы может привести к значительно более высокой вязкости вследствие большего внутреннего трения. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что в широком диапазоне температуры между солидусом и ликвидусом объемная доля жидкой фазы в расплаве композиции С-22 составляет около 20% и что подвижность жидкости с включениями твердой фазы появляется только тогда, когда доля жидкой фазы превышает 40—50%. Рассчитанное из фазовой диаграммы количество твердой фазы в С-22, приведенное на рис. 2, сохраняется почти постоянным до 2300—2330 °С и только при более высокой температуре начинает быстро падать. Это означает, что эффективный диапазон температуры, в котором существование твердой фазы влияет на гидродинамические проблемы, составляет всего 50—75 °С, т.е. нет существенной разницы в теплогидравлическом поведении композиций С-100 и С-22.

Разработанные методы и процедуры послеэкспериментального анализа слитков включают определение элементного состава, металло-, рентгенографический анализ; измерение микротвердости; оценку части первоначальной загрузки, что была расплавлена в ходе эксперимента; определение плотности; оценку объемной температуры.

И, наконец, для расширения базы данных о свойствах материалов как в твердой, так и жидкой фазе до температуры 2700 °С на первой фазе были измерены температура плавления, электропроводность, кинетическая вязкость и теплопроводность (см. табл. 2). Эти данные были использованы при конструировании экспериментальных установок. Их можно также применять при анализе безопасности АЭС.

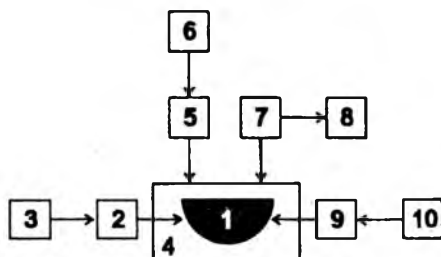
Крупномасштабные эксперименты серии «Расплав-АВ-200». После решения основных технических проблем и большого числа расчетов в обоснование конструкции, включая анализ возможных неопределенностей, был проведен крупномасштабный эксперимент. Установка «Расплав-АВ-200» и ее схема приведены на рис. 3, 4. Экспериментальная секция представляет собой узкий отсек шириной 0,116 м с цилиндрическим днищем радиусом 0,4 м, вмещающий около 200 кг расплава. Максимальная мощ-



Р и с. 2. Зависимость количества твердой фазы (□) и эффективной вязкости (Δ) композиции С-22 от температуры



Р и с. 3. Установка «Расплав-АВ-200»



Р и с. 4. Блок-схема установки «Расплав-AW-200»: 1 — экспериментальная секция; 2 — система водоохлаждения; 3 — аварийная система водоохлаждения; 4 — вакуумная защитная камера; 5 — газовакуумная система; 6—10 — система аварийной подачи инертного газа, измерения и автоматического контроля параметров, электропитания, управления соответственно



Р и с. 5. Загрузка экспериментальной секции «Расплав-AW-200-1»

ность, поступающая от тиристорного преобразователя в систему индукционного нагрева, составляет около 300 кВт на частоте 1800 Гц при оцененном коэффициенте полезного действия 40%. Для обеспечения граничного условия на верхней крышке, близкого к адиабатическому, был размещен специальный теплоизолирующий слой, состоящий из 41 кг композиции С-100 в виде брикетов и порошка. Общий вид загрузки, помещаемой в экспериментальную секцию, представлен на рис. 5. Для защиты боковых графитовых нагревателей использовался двухслойный протектор, выполненный из вольфрамовой и танталовой пластин толщиной 1 и 2,5 мм соответственно. Изотермические граничные условия на внешней стороне модели корпуса реактора обеспечивались системой водяного охлаждения. Система диагностики содержала более 150 различных измерительных каналов (положение термопар и пирометров показано на рис. 6), где размещены:

пирометры, измеряющие температуру расплава и нагреваемых графитовых пластин;

стандартные высокотемпературные вольфрам-ренийевые термопары;

специально разработанные высокотемпературные газонаполненные термопары;

ультразвуковой термометр;

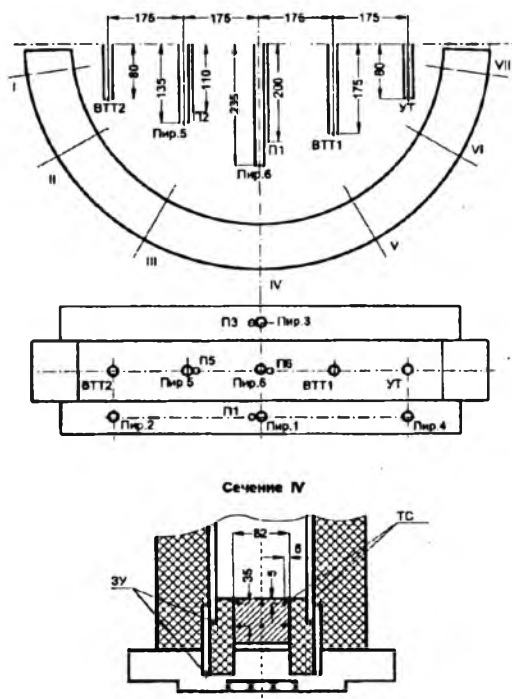
стандартные хромель-алюмелевые термопары для измерения температуры тест-стенки;

термопары для измерения температуры в системе охлаждения;

расходомеры для измерения расхода воды во всех ветвях системы охлаждения;

датчики давления, газоанализаторы и т.д.

После сборки установки была проведена серия испытательных пусков («сухие» тесты без загрузки расплава), при которых проводилась наладка и апробирование основных инженерных систем: тиристорного преобразователя, магнитопроводов, газовакуумной системы, системы



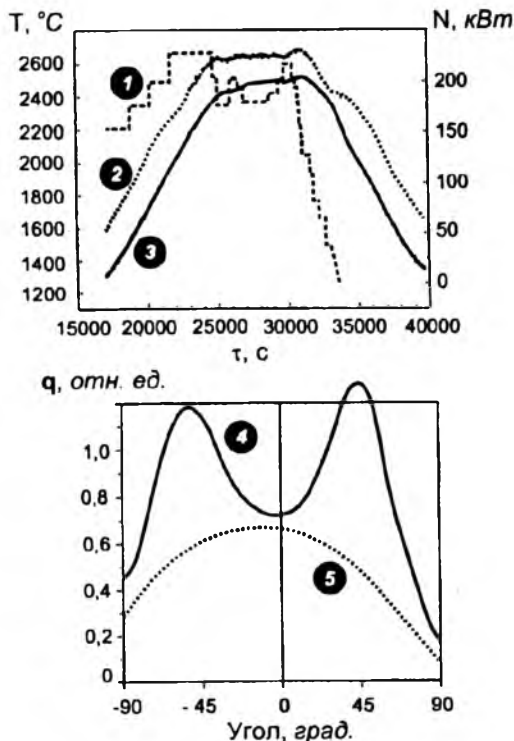
Р и с. 6. Положение основных датчиков температуры: Пир. — пирометр; ВТТ — высокотемпературные термопары; П — W/Re термопары, дублирующие пирометры; ТС — термопары со стороны тест-стенки; ЗУ — термопары замораживающего устройства; УТ — ультразвуковой датчик температуры

охлаждения. Кроме того определены коэффициент полезного действия системы индукционного нагрева и распределение тепловыделения по площади графитовых пластин.

Первый крупномасштабный эксперимент был проведен 9 октября 1996 г. Во время его проведения была достигнута максимальная 2650 °C температура, обеспечивающая перегрев расплава выше температуры ликвидуса (рис. 7). Квазистационарный уровень температуры в расплаве активной зоны поддерживался более 2 ч.

На рис. 8 представлен слиток расплава после разборки системы индукционного нагрева и удаления протектора и субпротектора. На боковой поверхности виден приблизительный контур расплавленной части и крупные зерна, ось которых совпадает с направлением тепловых потоков. Полость в верхней части слитка между зеркалом расплава и «мостом» из нерасплавленных брикетов образовалась при охлаждении из-за разности плотности жидкого и твердого расплава. Наличие естественной конвекции в расплаве было подтверждено по разным признакам. В первом эксперименте средний тепловой поток через тест-стенку составил около 100 кВт/м², что было определено на основе температурных измерений в тест-стенке и подтверждается измерениями температуры в системе водяного охлаждения. Начиная с 25 000 с наблюдалась постепенная перестройка профиля локального потока через тест-стенку. Если на начальной стадии максимум потока соответствует в нижней точке тепловыделению нагреваемой графитовой стенки, то на заключительной стадии эксперимента четко выявлены два максимума, соответствующие углам $\pm 45^\circ$.

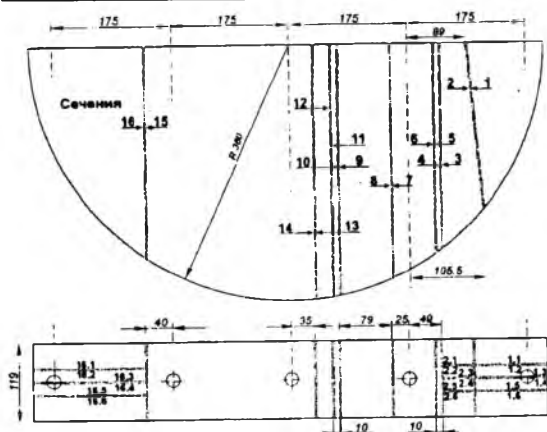
Такая перестройка профиля однозначно говорит о конвективном характере переноса. Кроме того на стадии охлаждения по показаниям термопар зарегистрирован переход от конвективного охлаждения к охлаждению за счет теплопроводности. Однако наиболее интересные и важные результаты получены при проведении материаловедческих исследований слитков (рис. 9, 10). Обнаружены два слоя с четкой границей раздела: верхний — легкий слой, обогащенный цирконием. В нижнем тяжелом обогащенном ураном слое отношение U/Zr изменяется (рис. 11). Оцененная по результатам анализа образцов доля расплава активной зоны составила около 70% начальной загрузки.



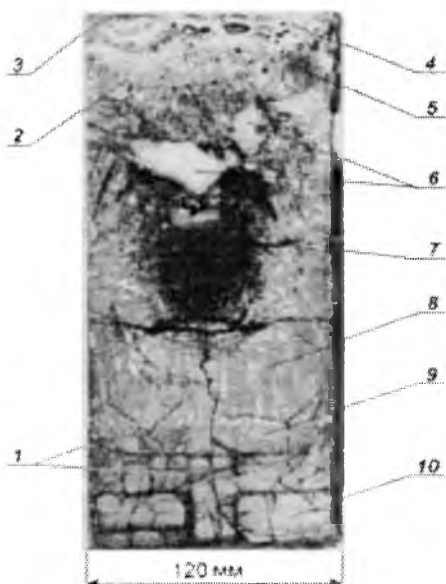
Р и с. 7. Электрическая мощность, температура расплава и распределение тепловых потоков вдоль охлаждаемого имитатора стенки корпуса: 1 — мощность; 2, 3 — пирометр № 6, 5 соответственно; 4 — конечное состояние; 5 — начальное состояние



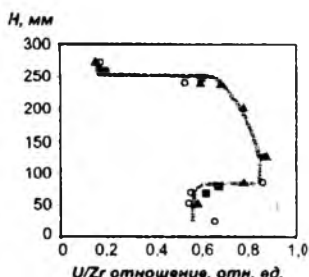
Р и с. 8. Вид слитка, полученного в результате эксперимента



Р и с. 9. Схема разрезки слитка секции «Расплав-АВ-200-1»



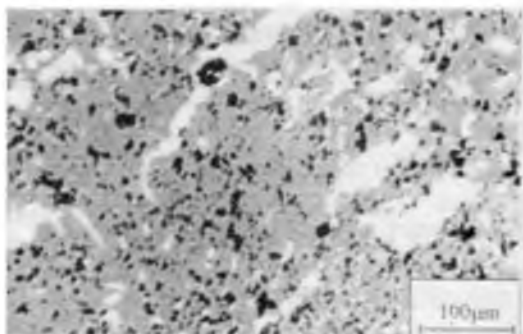
Р и с. 10. Макроструктура слитка в сечении 9: 1 — протечки в зазоры; 2 — граница основной расплава — верхний слой; 3 — зеркало расплава; 4 — верхний слой; 5 — овальная раковина; 6 — раковина неправильной формы; 7 — центральная усадочная раковина; 8 — основной расплав; 9 — граница расплава — нижние брикеты; 10 — нерасплавленные брикеты



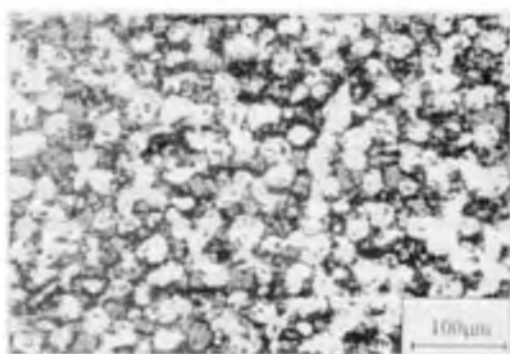
Р и с. 11. Распределение U/Zr по высоте сечения 9 слитка: $\circ$, $\triangle$ — химический анализ, проведенный в НПО «Луч» и ВИС соответственно; $\blacksquare$ — металлографические и микро-рентгеноспектральные анализы (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Образцы, которые вырезаны из расплавленной части слитка и нерасплавленных брикетов, располагавшихся вблизи границы расплава, имеют температуру полного растекания 2570—2580 °C, что на 170—180 °C выше температуры ликвидуса состава С-22. Расчеты по программе GEMINI [8] показали соответствие полученной для тяжелой фазы температуры равновесной фазовой диаграмме $U-Zr-O$ [9]. Для легкой фазы экспериментально измеренная температура растекания оказалась гораздо выше, даже при нагреве до температуры 2700 °C не наблюдалось полного плавления и растекания образцов, взятых из верхнего слоя. Одной из причин является высокое содержание углерода в легком слое, который и определяет повышенную температуру растекания.

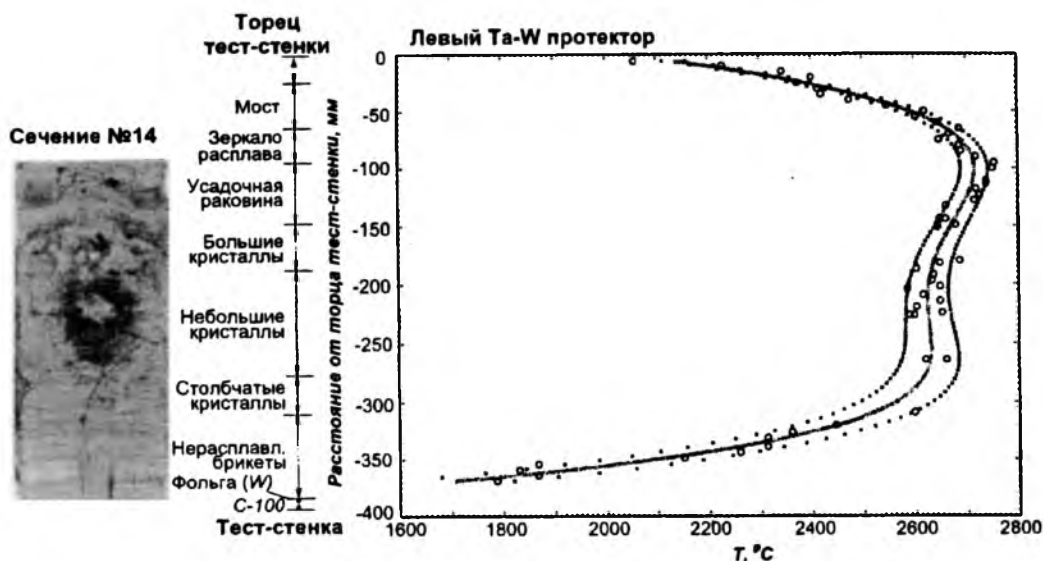
Металлографический анализ показал (рис. 12, 13), что композиция С-22 состоит из двух фаз: светлой и серой. В «основном» (нижнем слое) серая фаза занимает объем ~ 80% и имеет оксид-



Р и с. 12. Микроструктура средней части сечения 9 слитка



Р и с. 13. Микроструктура верхнего слоя над расплавом (образец 5)



Р и с. 14. Распределение температуры по танталовому субпротектору в сечении 14

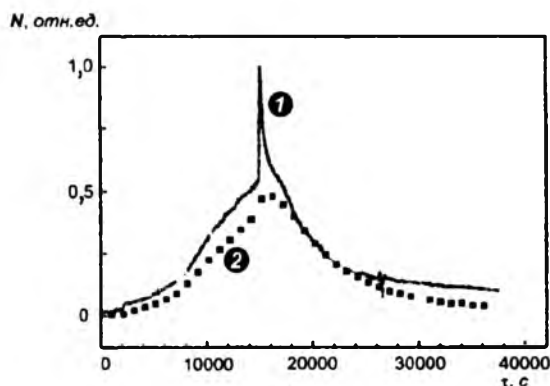
ный состав $(U_{0,8}Zr_{0,2})O_{1,8}$, в верхнем слое она равна $\sim 20\%$. Верхний слой на 80% состоит из светлой фазы металлоподобного состава $(Zr_{0,98}U_{0,02})O_xC_y$.

Рис. 14 характеризует распределение температуры по субпротектору из тантала в сечении 14. На торцах (сечения 1 и 15) наблюдается зона расплавления, которой соответствует температура на субпротекторе $\sim 2200^\circ\text{C}$, что ниже температуры плавления. Очевидно, что расплав разогревался массопередачей тепла из центральной части за счет конвекции. Об этом свидетельствует также выпуклая форма торцов слитка.

При подготовке второго эксперимента секция «Расплав-AW-200-2» была модифицирована и отличалась от предыдущей измененной геометрической формой индуктора, увеличенным сечением магнитопровода, измененной теплоизоляции между индуктором и графитовой стенкой-нагревателем, уменьшенной теплоизоляцией между тест-стенкой и охлаждающей медной плитой, измененной конструкцией замораживающихся уплотнений. Эти изменения были внесены в конструкцию для достижения более равномерного поля температуры на графитовой стенке-нагревателе и вольфрамовом протекторе. Во втором эксперименте предполагалось также увеличить тепловой поток через охлаждаемую тест-стенку по меньшей мере в 2 раза.

Эксперимент «Расплав-AW-200-2» был проведен 24 мая 1997 г. В отличие от первого эксперимента во втором была значительно сокращена фаза нагрева, скорость роста температуры была примерно в 2 раза выше, чем в первом. Максимально зарегистрированный поток через тест-стенку также почти в 2 раза превышал его значение для первого эксперимента (рис. 15). На рис. 16 представлен общий вид слитка расплава (левая сторона) после разборки установки.

В эксперименте достигнуто расплавление $> 70\%$. После завершения экспе-



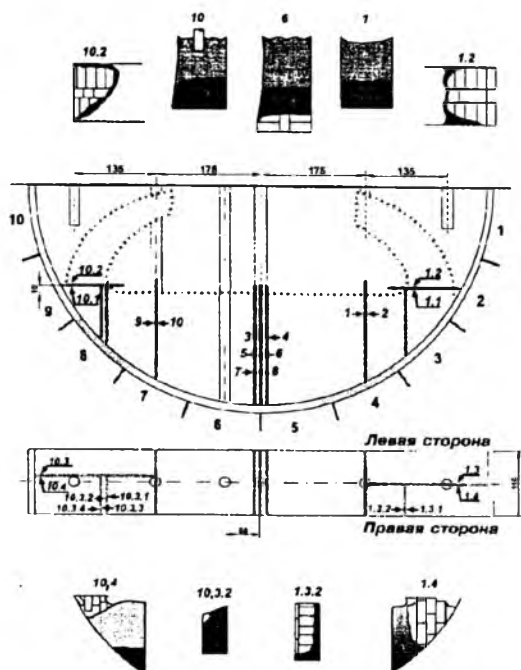
Р и с. 15. Тепловые потери через тест-стенку в эксперименте «Расплав-AW-200-2»: 1 — тепловой баланс; 2 — эксперимент



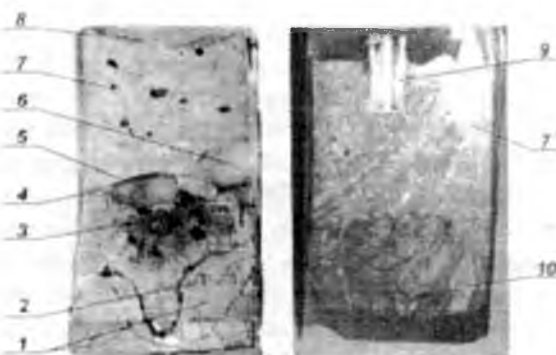
Р и с. 16. Вид слитка, полученного в эксперименте «Расплав-AW-200-2»

римента и разборки установки были выполнены материаловедческие исследования слитка (рис. 17, 18). Как в первом эксперименте, на макрошлифах обнаружена стратификация расплава на два слоя с достаточно четкой границей. Верхний слой — более светлый и пористый, обогащен до ~ 40% светлой фазой на основе ZrO_x с примесью углерода, средняя плотность слоя ~ 9 г/см³. Нижний слой обогащен фазой на основе UO_2 (до ат. доли ~ 80%), средняя плотность слоя ~ 9,9 г/см³. Из рис. 19 видно, что отношение U/Zr резко уменьшается в верхнем слое. Экспериментально измеренная температура растекания образцов, вырезанных из характерных объемов слитка, соответствует измеренным значениям в первом эксперименте. Исследование степени карбидизации танталового субпротектора позволило восстановить достигнутую в эксперименте температуру (рис. 20). Максимальная температура оказалась примерно на 100 °С ниже, чем в эксперименте «Расплав-AW-200-1». В табл. 3 сопоставлены основные результаты серии экспериментов «Расплав-AW-200».

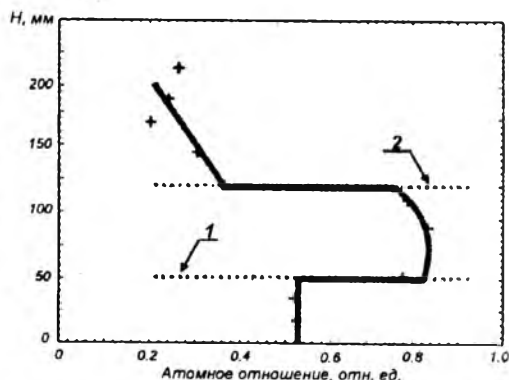
Р и с. 19. Распределение U/Zr по высоте слитка в эксперименте «Расплав-AW-200-2»: 1 — граница расплав—брикет; 2 — граница легкой фазы

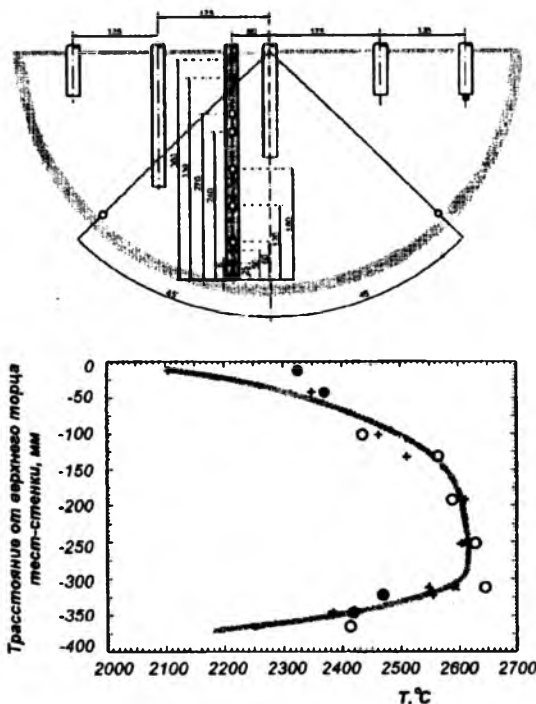


Р и с. 17. Схема разрезки слитка в эксперименте «Расплав-AW-200-2»



Р и с. 18. Вид макрозон в сечениях слитка в эксперименте «Расплав-AW-200-2»: 1 — нерасплавленные брикеты; 2 — граница — низ расплавленных брикетов; 3, 10 — основной расплав; 4 — граница между основным расплавом и верхним слоем; 5 — центральная полость; 6 — овальная полость; 7 — верхний слой; 8 — зеркало расплава; 9 — трубка пирометра № 6





Р и с. 20. Распределение температуры вдоль левого субпротектора (центральное сечение) в эксперименте «Расплав-AW-200-2» и схема размещения мониторов: $\times$ — взаимодействие Ta—W; $+$ — взаимодействие Ta—графит; $\circ$ — монитор W—Ta; $\bullet$ — монитор W—Mo

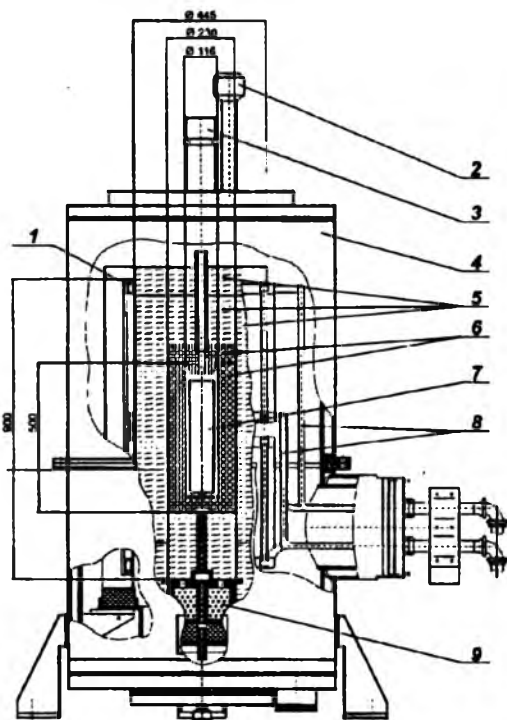
Т а б л и ц а 3. Основные результаты серии экспериментов «Расплав-AW-200»

Параметр	«Расплав-AW-200-1»	«Расплав-AW-200-2»
Максимальный тепловой поток через тест-стенку, кВт/м^2	~ 130	~ 250
Доля жидкой фазы расплава	~ 70%	> 70%
Особенности	Стратификация на две жидкости, соответствующая фазовой диаграмме, с разной плотностью и отношением U/Zr Наличие температуры растекания и физических свойств расплава. Перераспределение тепловых потоков по углу тест-стенки вследствие перехода теплообмена с теплопроводного на конвективный режим	«Переходный» режим стратификации. Взаимодействие стали корпуса с расплавом
Примечание. Композиция С-22, 200 кг, режим теплопереноса — теплопроводность + конвекция.		

Основные экспериментальные результаты исследований на установке «Тюльпан». После ввода в эксплуатацию на ней были выполнены эксперименты, подтвердившие соответствие ее параметров проектным (рис. 21).

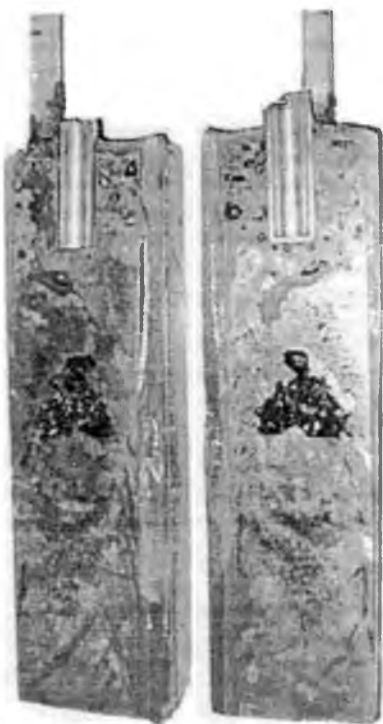
На следующем этапе были тестированы датчики высокотемпературной системы измерений (в частности, пирометры), предназначенные для использования в экспериментах серии «Расплав-AW-200». Помимо этого в рамках согласованной программы исследований были выполнены эксперименты по изучению стратификации расплава (эксперимент Т3) и образования и поведения корки на охлаждаемой поверхности имитатора корпуса (эксперимент Т4).

Р и с. 21. Конструкционная схема установки «Тюльпан» (мощность до 250 кВт, частота 1000 Гц; экспериментальная секция: диаметр 116 мм, высота 440 мм, среда Ar): 1 — индуктор; 2, 3 — пирометр № 3 и 4 соответственно; 4 — газовакуумная камера; 5 — теплоизоляция; 6 — нагреватель; 7 — экспериментальная секция; 8 — токовод; 9 — ловушка

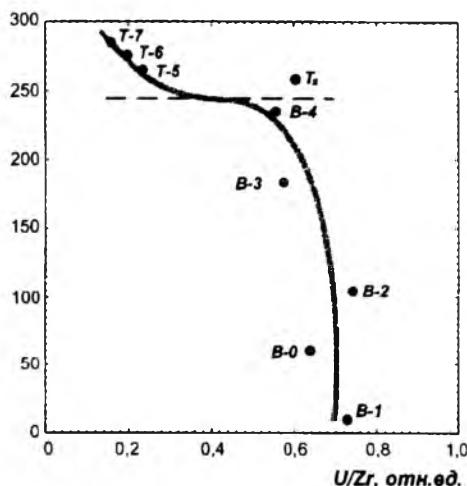


Выбор расплава С-22 для первого эксперимента определялся необходимостью дальнейшего исследования стратификации при отсутствии явно выраженной конвекции в нем. Для второго эксперимента был выбран С-100, характеризующийся более простой фазовой диаграммой.

Результаты, полученные в эксперименте Т3, оказались подобны результатам экспериментов АW-200. Как и в крупномасштабных экспериментах, были обнаружены стратификация расплава на два слоя — легкий и тяжелый и изменение отношения U/Zr по высоте слитка (рис. 22). Неожиданно вариация U/Zr по высоте слитка выявилась в эксперименте Т4 (рис. 23, 24).



Р и с. 22. Разрезанный слиток после эксперимента Т3



Р и с. 23. Распределение отношения U/Zr по высоте слитка в эксперименте Т3: — — — граница, обнаруженная между слоями расплава активной зоны



Р и с. 24. Распределение отношения U/Zr по высоте слитка в эксперименте Т4: — — — начальное значение

Основные результаты исследований на установке «Расплав-соль». Картина течений в керамическом расплаве на днище корпуса определяется естественной конвекцией, которая в свою очередь зависит от числа Рэлея, характеризующего отношение сил плавучести и вязкого трения. Характерные числа Рэлея (Ra) для экспериментов на установке «Расплав-АW-200» с керамическим расплавом $\sim 10^{11}$, тогда как при реальной аварии ожидаемые значения числа Рэлея могут превышать 10^{15} [6]. Специальные исследования по естественной конвекции жидкости при числе Рэлея до 10^{14} были проведены на установке «Расплав-А-соль», одной из задач которых была под-

держка разработки проекта установки «Расплав-AW-200». В табл. 4 приведены основные параметры серии экспериментов, выполненных на первой фазе проекта «Расплав» для прямого экспериментального сравнения теплопередачи при объемном и стеночном методах нагрева, исследования влияния процесса образования корки на тепломассоперенос в случае объемного и стеночного нагрева и изучения поведения кашеобразного расплава в диапазоне температуры между солидусом и ликвидусом.

Т а б л и ц а 4. Матрица экспериментов на установке «Расплав-соль»

Номер серии	Композиция соли	Цель серии / Метод нагрева	Ra	Pr
S0	NaF—NaBF ₄ 8:92	Контрольный эксперимент/SWH	$7,1 \cdot 10^{12}$	5,2
S1	NaF—NaBF ₄ 8:92	Исследование процессов теплопередачи при вариации числа Ra/SWH	$(0,6-5)10^{13}$	3,5—7,5
S2	NaF—NaBF ₄ 8:92	Исследование процессов теплопередачи при вариации числа Ra с коркой и без нее/SWH	$(0,2-2,2)10^{13}$	4,2—7,6
S3	NaF—NaBF ₄ 8:92	Исследование процессов теплопередачи при вариации числа Ra с коркой и без нее/DEH	$10^{12}-1,5 \cdot 10^{13}$	4,4—7,5
S4	NaF—NaBF ₄ 25:75	Исследование процессов теплопередачи для интервала температуры между солидусом и ликвидусом	$\sim 10^{13}$	~ 6
S5	Li—NaF—KF 46,5:11,5:42	Исследование процессов теплопередачи при прототипных числах Прандтля (будет проведено во время второй фазы проекта «Расплав»)	$10^{10}-10^{12}$	0,8—4

Были проведены исследования естественной конвекции с использованием бокового и объемного нагрева в той же геометрии, какую предполагалось использовать в установке «Расплав-AW-200». Результаты экспериментальных исследований подтвердили вывод о подобии процессов теплопередачи к охлаждаемой стенке при боковом и объемном нагреве бассейна расплава. Впервые проведены исследования процессов теплопередачи с изотермическими граничными условиями и естественным образованием корок вследствие внешнего охлаждения. Полученные результаты внесли большой вклад в верификацию расчетных программ.

Расчетно-теоретические исследования. До проекта «Расплав» применение расчетных программ ограничивалось двумерными расчетами процессов естественной конвекции в жидкости. Расчеты позволили смоделировать процессы теплопередачи для свободной конвекции тепловыделяющей жидкости с использованием дополнительных моделей, например, модели турбулентности для больших чисел Рэлея. Потребности адекватного моделирования процессов в установках «Расплав» поставили вопрос о развитии и использовании трехмерных программ, а также разработке моделей для описания расплава. Эта задача была успешно решена на первой фазе проекта, когда были развиты программные средства анализа и интерпретации экспериментов, в том числе двух- и трехмерные программы для моделирования конвекции и теплопроводности в сложных системах. Кроме того, были развиты и использовались программы по магнитной гидродинамике для анализа возможности нагрева расплава путем прямого пропускания тока. На основании расчетного анализа были сделаны важные выводы об идентичности процессов тепломассопереноса при объемном тепловыделении и стеночном нагреве. Разработанные коды CONV-2D и 3D учитывают следующие явления: конвективный перенос тепла при объемном или стеночном нагреве жидкости; турбулентность потока при больших числах Ra;

присутствие жидкой и твердой фазы в области между температурой солидуса и ликвидуса;

теплопроводность твердых фаз с учетом плавления и затвердевания.

Результаты верификации программ по данным, полученным в экспериментах с различными моделирующими жидкостями в прямоугольной, плоской и полусферической геометрии, доказывают применимость этих программ для моделирования процессов в сложной трехмерной геометрии.

Использование программ позволило качественно и количественно описать результаты эксперимента. На рис. 25, 26 представлены некоторые результаты сравнения расчетных значений с экспериментально полученными. Разработанные расчетные программы широко используются для обоснования и выбора конструкции основных элементов экспериментальных установок: замораживающего уплотнения, системы индукционного нагрева, системы охлаждения.

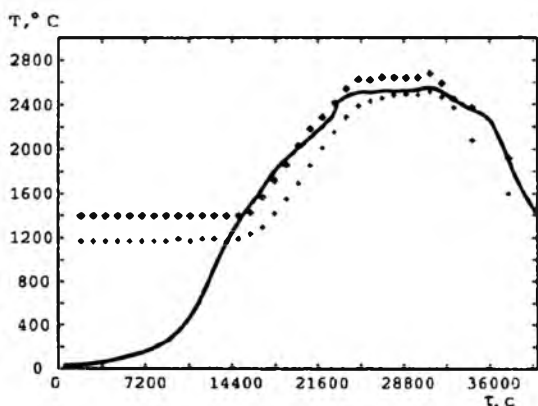
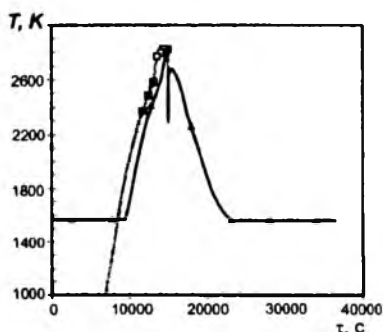
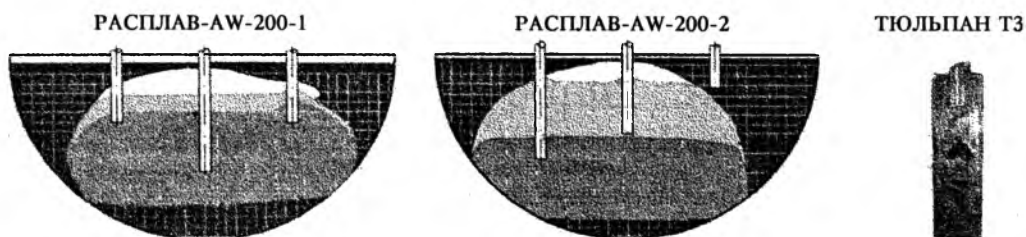


Рис. 25. Расчетная (—) и измеренная температура расплава (□ — пирометр № 6; + — термопара П1) в эксперименте «Расплав-AW-200-1»



Р и с. 26. Расчетная (□) и измеренная температура расплава (Δ) пирометром № 6 в эксперименте «Расплав-AW-200-2»

Некоторые явления, обнаруженные в экспериментах на первой фазе проекта «Расплав». Эксперименты с расплавом С-22 выявили несколько явлений, связанных с перераспределением плотности расплава и отношения U/Zr по высоте слитков (рис. 27). Установлено образование двух слоев, разделенных четкой границей. Сопоставление с фазовой диаграммой $ZrO_{0,43}-UO_2$ показывает, что в эксперименте «Расплав-AW-200-1» этот процесс, по-видимому, достиг равновесной стадии, когда как в экспериментах «Расплав-AW-200-2» и ТЗ на установке «Тюльпан» имела место переходная стадия. Анализ фазовых диаграмм для расплава при температуре 2600 °С показывает, что разделение исходной композиции на два слоя будет происходить и при других исходных композициях, содержащих металлический цирконий. Стратификация расплава, разумеется, влияет на естественную конвекцию в бассейне расплава. Расплав С-22 не является эвтектическим сплавом и в твердом состоянии содержит



Р и с. 27. Явления стратификации, обнаруженные в экспериментах проекта «Расплав»

сильно различающиеся фазы: оксид урана с небольшой добавкой циркония и металлический цирконий с растворенным кислородом. Эти фазы имеют существенно различающийся удельный вес. Можно предположить, что после плавления малые объемы этих фаз $\alpha\text{Zr(O)}$ и $(\text{UZr})\text{O}_{2-x}$ некоторое время присутствуют в расплаве, что является причиной дальнейшей стратификации, определяющейся, по-видимому, конвективным переносом как более интенсивным в условиях эксперимента проекта «Расплав».

Особенностью экспериментов является наличие в расплаве углерода в количестве 0,3—0,4% по массе. Углерод в основном растворен в светлой фазе, обогащенной цирконием в атомной доле 5—6%. Образование оксикарибидов повышает температуру растекания светлой фазы. Углерод, по-видимому, не меняя физической причины разделения фаз, может ускорять процесс сепарации или фиксировать легкий слой во время конвекции. Фазовые диаграммы U—Zr—O , рассчитанные по программе GEMINI при 2600 °С, предсказывают наличие двух несмешивающихся жидкостей в достаточно широкой области составов расплава.

Основные результаты первой фазы проекта «Расплав». В процессе реализации первой фазы проекта «Расплав» основные цели достигнуты, разрешены основные технические проблемы, развита технология крупномасштабного эксперимента в контролируемых условиях расплава, разработаны вычислительные программы для анализа результатов эксперимента.

1. Выполнены измерения некоторых физических свойств расплава активной зоны разного состава при температуре до 2850 °С: вязкости, тепло-, электропроводности и температуры плавления. Физические свойства расплава в жидкой фазе измерены впервые в мире.

2. Два крупномасштабных эксперимента серии «Расплав-AW-200» дали важные результаты об отличиях поведения расплава по сравнению с поведением моделирующих жидкостей при температуре, превышающей 2650 °С. Во время испытаний был обеспечен контроль и регистрация всех основных теплофизических параметров. Экспериментально обнаружены стратификация расплава на две жидкости и существенное изменение распределения отношения урана к цирконию по высоте слитка для расплава разного состава.

3. Пять серий экспериментов с исследованием в качестве имитаторов расплава специальных солей позволили понять влияние методов нагрева и образования корки на процесс естественной конвекции. Эти результаты дали возможность верифицировать вычислительные модели при высоких числах Рэлея, разных методах нагрева, наличии переходной зоны, плавлении и повторном затвердевании корки.

4. Разработанные аналитические и программные средства учитывают наиболее важные процессы, такие, как естественная циркуляция расплава, образование корок и их динамика, поведение конструкционных материалов и т.д. Трехмерный подход позволяет рассматривать конструкционные особенности экспериментальных установок, включая реальную геометрию и метод нагрева. Несколько дополнительных моделей, в том числе модель кашеобразной зоны, были включены в расчетную программу. Верификация расчетной программы проведена как по данным экспериментов с расплавом, так и на основе экспериментов с моделирующими жидкостями, включая эксперименты на солевой установке. Результаты экспериментов описываются с достаточной степенью точности, что позволило интенсивно использовать расчетные программы во время подготовки крупномасштабных экспериментов.

5. Обнаруженные новые явления, характерные для поведения расплава, позволили сформулировать рекомендации для продолжения программы исследований на второй фазе проекта «Расплав». На первой фазе исследований были обнаружены особенности поведения расплава, задачей второй фазы является изучение физических механизмов, приводящих к рассмотренным особенностям и влияющих на возможность удержания расплава в корпусе реактора. Вторая фаза направлена на выяснение физических ме-

ханизмов, в частности, должны быть выявлены условия возникновения стратификации и ключевые механизмы массопереноса. Кроме того, должна быть существенно расширена база данных о свойствах материалов. Для этого предполагается проведение как маломасштабных экспериментов по изучению отдельных явлений, так и интегральных крупномасштабных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Broughton J., Kaun P., Petti D., Tolman E. A scenario of the Three Mile Island Unit 2 Accident. — Nucl. Technol., 1989, v. 87, № 1.
2. Okkonen T. In vessel core debris cooling through external flooding of the reactor pressure vessel. — In: Proc. OECD/CSNI/NEA Workshop on Large Molten Pool Heat Transfer, Grenoble, France, 1994.
3. Theofanous T., Liu C., Additon S. e.a. In-vessel coolability and retention of a core melt. — In: Proc. Water Reactor Safety Information Meeting NUREG/CP-0157, US, NRC, 1997, v. 2, p. 173—238.
4. Kumalainen O., Tuomisto H., Hongisto O., Theofanous T. Heat flux distribution from a volumetrically heated pool with high Rayleigh number. — J. Nucl. Engng, Desing, 1994, v. 149, p. 401—408.
5. Asfra F., Dhir V. Natural convection heat transfer in volumetrically heated spherical pools. — In: Proc. OECD/CSNI/NEA Workshop on Large Molten Pool Heat Transfer, Grenoble, France, 1994.
6. Theofanous T., Liu C. Natural convection experiments in a hemisphere with Rayleigh number up to 10^{15} . — In: Proc. ANS National Heat Transfer Conference, Portland, 1995.
7. Cheung F., Haddad K., Liu C. A scaling law for the local CHF on the external bottom side of a fully submerged reactor vessel. — In: Proc. Water Reactor Safety Information Meeting NUREG/CP-0157, US, NRC, 1997, v. 2, p. 153—276.
8. Gibbs Energy Minimizer Software. THERMADATA-BP66-38402. Saint Martin D'Heres CEDEX — France.
9. Fe—O—U—Zr Thermochemical Database developed by THERMADATA in collaboration with IPSN. THERMADATA-BP66- 38402. Saint Martin D'Heres CEDEX — France.

Поступила в Редакцию 27.02.98

УДК 621.039.586

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОКСИДНЫХ КОМПОНЕНТОВ РАСПЛАВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ С ДИОКСИДГАФНИЕВОЙ И ДИОКСИДЦИРКОНИЕВОЙ КЕРАМИКОЙ

*Акопов Ф.А., Акопян А.А., Барыкин Б.М., Вальяно Г.Е.,
Минеев В.Н., Чернышов Г.П. (НИЦ ТИВ НО ИВТАН)*

В расплаве активной зоны ВВЭР в результате реакций ядерного деления и пароциркониевых реакций развивается температура до 2500—2800 К. Поэтому важно подобрать для ловушки расплава наиболее подходящие огнеупорные материалы и изучить их взаимодействие с расплавом.

Ранее [1, 2] было исследовано взаимодействие керамики на основе диоксида циркония с металлическими и оксидными компонентами расплава активной зоны, а также со смесью, его имитирующей. В целях расширения перечня возможных материалов для ловушки было изучено взаимодействие керамики на основе диоксида гафния с вероятными компонентами расплава активной зоны. Диоксид гафния, будучи во многом аналогом диоксида циркония, имеет температуру плавления около 3200 К, т.е. на 200° выше, чем у последнего. Выше у него и температура полиморфного моноклинно-тетрагонального перехода (2100 К против 1400—1500 К у диоксида циркония) [3]. Химические свойства диоксида гафния, в частности, диаграммы состояния систем с металлами и оксидами переходных элементов мало изучены.

В расплаве активной зоны присутствуют компоненты стали, цирконий, оксиды урана, а также продукты окисления циркония и стали, причем в зависимости от газовой среды соотношение металл/оксид может меняться в широких пределах. Следует от-