

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ТЕЧИ ИЗ БАКА ДЛЯ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТА РУ ВВР-ц (ИБВ.10М)

**В.В. Сергеев\*, О.Ю. Кочнов\*\*, А.А. Казанцев\*\***

\* *ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*

\*\* *НИФХИ им. Карпова, г. Обнинск*



Представлены результаты расчетов динамики расхолаживания реакторной установки (РУ) в режиме естественной циркуляции при гипотетической аварии с течью теплоносителя, постулируемой стандартами ООБ. Исходное событие аварии – появление течи из бака реактора, приводящее к резкому снижению уровня теплоносителя в баке. Показано, что принятые при модернизации РУ конструктивные меры (установка гидрозатвора на сливном тракте непосредственно в баке РУ в сочетании с верхним размещением подвода теплоносителя к активной зоне) значительно повышают степень безопасности аппарата при рассматриваемой максимальной проектной аварии. Расчеты выполнялись по международному теплогидравлическому контурному коду TRAC, предназначенному для анализа технической безопасности водоохлаждаемых энергетических ЯЭУ.

**Ключевые слова:** ВВР-ц модернизированной компоновки (ИБВ.10М), динамика расхолаживания активной зоны реактора, максимальная проектная авария, теплофизическое моделирование, течь в первом контуре, обоснование безопасности реактора, код TRAC.

**Key words:** VVR-C of modernized design (IBB 10M), transient reactor core cooling, maximal design accident, thermal physic simulation, leak in primary circuit, safety analysis of reactor, TRAC code.

## ВВЕДЕНИЕ

В СССР в эксплуатации находилось более 97-ми исследовательских реакторов [4]. Сейчас их число уменьшилось до 49-ти, включая строящийся под С-Петербургом. После планового срока эксплуатации в 30 лет 47 ИЯУ остановлены или выводятся из эксплуатации. Аналогичные процессы закрытия прошли во всем мире, вызвав среди прочего утерю ряда технологий и мест производства материалов. Следует отметить, что реактор ВВР-ц в филиале НИФХИ им. Карпова в г. Обнинске оказался необходимым и востребованным, а ряд уникальных технологий, разработывавшихся здесь, остаются актуальными и в настоящее время.

Обнинская площадка с реактором ВВР-ц была создана для проведения исследований в области химии и радиохимии с использованием ядерного реактора,

© *В.В. Сергеев, О.Ю. Кочнов, А.А. Казанцев, 2012*

ускорителей и гамма-установок. В целевую задачу входила разработка технологий, которые потом могли бы быть доведены до больших промышленных заводов, например, модификация древесины. При воздействии на нее излучением получается новый материал с высокой прочностью. Стерилизация продукции сельскохозяйственного назначения также является перспективной технологией. Созданы изделия из композиционных материалов с улучшенными свойствами, проявляющимися после облучения на гамма-установках (например, память формы).

Часть научных достижений была доведена до промышленности. Всем известны коврики из вспененного полиэтилена с пониженной теплопроводностью для тепло- и шумоизоляции. Вторая внедренная технология – ядерно-легированный кремний, использующийся в силовой электронике и радиоэлектронной промышленности.

В настоящий момент потребности рынка изменились, и предприятиям, имеющим ядерные реакторы, пришлось приспособливаться, выпуская конкурентоспособную высокотехнологичную продукцию. Появилась возможность выхода на международный рынок с радионуклидной и другой продукцией. Большая часть ядерно-легированного кремния поставляется зарубежным заказчикам. Это очень качественный продукт, на несколько порядков превосходящий по однородности кремний, выпускающийся классическими не реакторными методами.

Реактор был включен в программу реконструкции, которая была принята еще в СССР. Обновленная установка должна была быть переориентирована на производство изделий из ядерно-легированного кремния. Цилиндры большого диаметра необходимы для производства управляющих клапанов высоковольтных линий электропередач, что являлось для того времени актуальной задачей. В современных условиях планируется увеличить мощность, сделать из ВВР-ц более экономичный и специализированный реактор под производство радионуклидной продукции. После закрытия ряда зарубежных (в основном, канадских) реакторов остался без производителей большой зарубежный рынок медицинских изотопов, прежде всего молибдена-99.

Для удовлетворения современных требований к конструкции реактора, которых не было во время его проектирования, реконструкция реактора включает в себя замену основной изношенной части оборудования, в том числе, корпуса реактора и части первого контура.

Реконструкция началась в 1985 г., но пик программы пришелся на перестроечные времена. Финансирование прекратилось в 1990-ые гг. и восстановилось в 2005 г. Работы возобновились. Корпус реактора и другое оборудование заказаны.

Реактор ВВР-ц был введен в эксплуатацию в 1964 г. После 30-ти лет эксплуатации в соответствии с процедурами и нормами регулярно продлевается срок службы. Проводятся экспертизы всего оборудования, после чего выдается разрешение на продление эксплуатации. По планам реконструкции будут заменены корпус реактора, первый контур, теплообменное оборудование, запорно-регулирующая арматура, а также системы, важные для безопасности (СУЗ, КИПиА, радиационный контроль и др.), будет построен новый комплекс по кондиционированию и временному хранению твердых радиоактивных отходов и так далее.

Из прежнего останется только площадка, само здание с бетонной шахтой. По сути дела, не сменяемо только само здание, где расположен реактор ВВР-ц.

Реконструкция бака выполнена с учетом следующего требования. Повышение безопасности реакторных установок достигается за счет конструктивного введения процессов, которые за счет естественных причин (без вмешательства оператора) обеспечивали бы надежный отвод остаточного тепловыделения после срабатывания аварийной защиты реактора и полного обесточивания установки.

Надежность отвода остаточного тепловыделения от активной зоны исследовательских реакторных установок бассейнового типа в условиях потери уровня теплоносителя в баке РУ является одним из важнейших условий их технической безопасности. Значимость проблемы определяется наличием практически открытой границы (зеркало испарения) между первым контуром и помещениями реакторной установки. При этом возрастает значение целостности оболочек ТВС, зависящее от температурного режима в период после остановки реактора.

Ранее в [1] используемая авторами расчетная модель была проверена на имеющихся опытных данных для ситуации, связанной с остановкой насосов первого контура. В представленном материале приводятся результаты расчетов наиболее важной для анализа безопасности аварии – максимальной проектной течи (МПА) из бака реактора в шахту. Рассматривается большая неконтролируемая течь – уровень опускается ниже верхнего среза АкЗ. В результате при отсутствии работы СПОТ происходит быстрое испарение жидкости в зоне с объемом 0,1 м<sup>3</sup> за счет остаточного тепловыделения. Компенсация осушения зоны должна контролироваться запуском душирующего устройства системы СПОТ.

### **РАСЧЕТНАЯ СХЕМА ПЕРВОГО КОНТУРА РУ ВВР-ц ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ПРИ МПА**

Численные расчеты рассматриваемой максимальной проектной аварии проводились по коду TRAC [2, 3] в нестационарной постановке на основании расчетной схемы первого и второго контуров, представленной на рис. 1, для модернизированной компоновки первого контура.

В целом использовалась одномерная сетевая расчетная схема, за исключением бака реактора, который моделировался двумерным пористым телом. Проточная часть активной зоны представлена в виде системы параллельных одномерных каналов. Рассматриваются пять групп ТВС в соответствии с их расстановкой по радиусу зоны с учетом неравномерности тепловыделения по радиусу и высоте АкЗ. Отдельно моделировались одна ТВС максимальной мощности (во втором ряду), одна ТВС минимальной мощности (в пятом ряду), групповой канал для охлаждения СУЗ и групповой канал межкассетных протечек.

Математическая модель кода TRAC основана на численном решении системы из шести нестационарных одномерных (сетевая часть модели) и трехмерных уравнений теплогидравлики (бак реактора) для двухфазной среды с неконденсируемым газом (вода-пар-воздух) в неравновесном негомогенном приближении.

### **АНАЛИЗ БОЛЬШОЙ ТЕЧИ НА НИЖНЕЙ ОТМЕТКЕ БАКА БЕЗ ЗАПУСКА ДУШИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА СПОТ**

При рассмотрении следующих ниже проектных аварий предполагается автоматический сброс мощности в течение 1 с от начала аварии и остановка всех ЦН1. Полная остановка ЦН1 происходит в течение 7 с от сброса мощности (по опытным данным выбега насоса). Рассматривается течь на нижнем сварном шве бака (1 м от дна) сечением 200 см<sup>2</sup> (треть периметра). При большой течи в баке без запуска СПОТ имеют место следующие процессы:

- быстрое снижение уровня жидкости до верхней отметки АкЗ в течение 120 с;
- опорожнение верхней подъемной части гидрозатвора (по ходу теплоносителя в номинале) до уровня АкЗ в течение 120 с, сопровождающееся прогревом жидкости в АкЗ до температуры закипания 100°C;
- процесс объемного кипения до начала перегрева оболочек ТВС (интервал 18 мин);

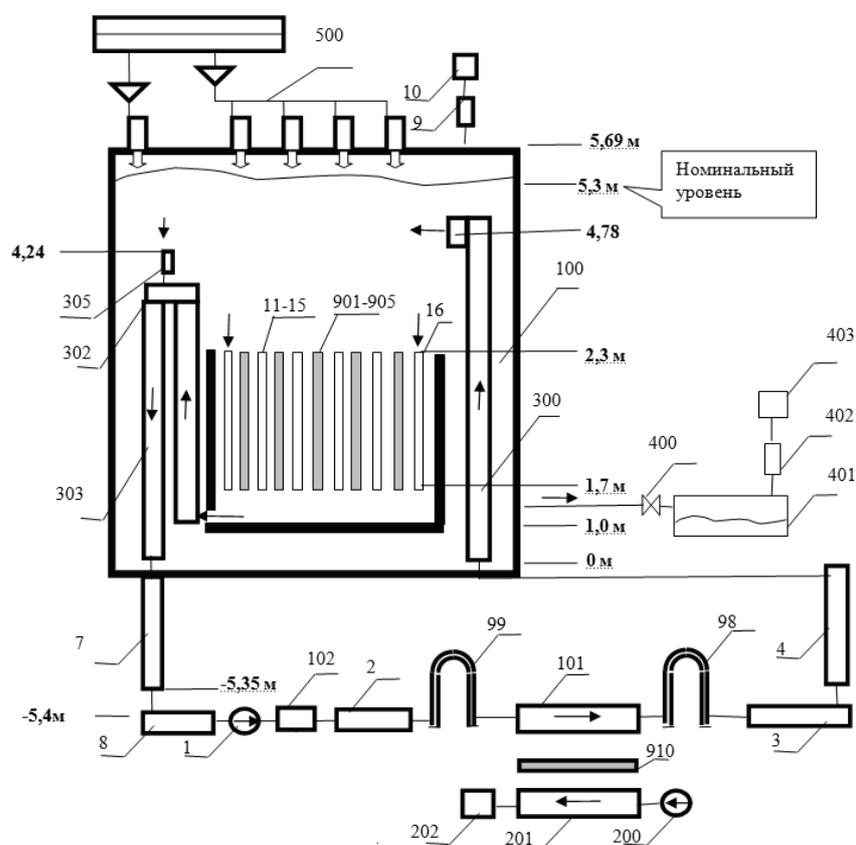


Рис. 1. Расчетная схема первого контура РУ для моделирования проектных аварий. Имитатор течи на баке № 400-403

**Список обозначений к расчетной схеме**

Таблица 1

Позиция	Обозначение	Позиция	Обозначение
1	Группа ЦН первого контура	11–15	Проточная часть пяти групп ТВС (по радиусу)
102	Тройник	16	Тракт межкассетных протечек и СУЗ
400	Клапан-имитатор течи	303, 302	U-образный гидрозатвор
401	Бокс сбора дренажа первого контура	305	Канал воздухоудаления гидрозатвора
402	Воздуховоды	7, 8	Подводящий тракт к ЦН
403	Компенсатор давления (атмосфера)	10	Компенсатор давления бака (атмосфера)
2	Нагнетательный тракт	200	Группа ЦН второго контура
99, 98	Гидрозатворы теплообменников	201	Теплообменники (второй контур)
101	Теплообменники (первый контур)	202	Компенсатор давления по второму контуру
3, 4	Подводящий тракт к баку РУ	901–905	ТВС (пять групп по радиусу АЗ)
300	Подводящие две трубы в баке РУ	910	Трубы теплообменников
100	Бак РУ	500	Система СПОТ (душ и подпитка)

**Сценарий аварии**

Событие	Момент, с	Событие	Момент, с
Номинальный режим	0 – 997	Остановка всех ЦН1	1000 – 1007
Раскрытие течи	997 – 1000	Запуск подпитки бака от СПОТ	1000
Сброс мощности	1000		

• процесс перегрева стенки ТВС, связанный с частичным осушением сборки (интервал времени прогрева до температуры плавления оболочек ТВС 600°C составляет 13 мин).

Таким образом, в данной ситуации имеется запас времени не более 20-ти минут для запуска душирующего устройства СПОТ. В противном случае авария переходит в запроектную стадию.

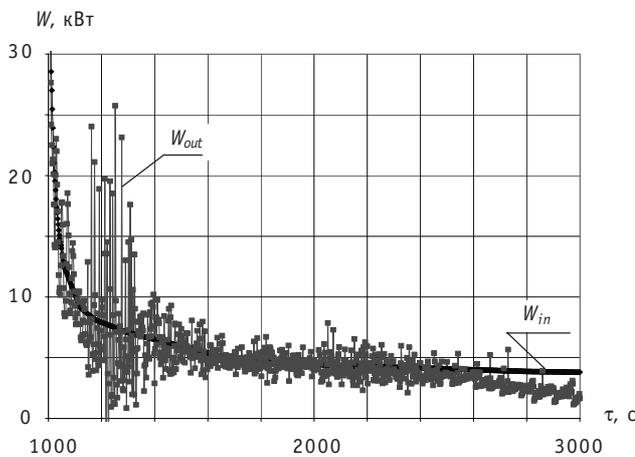


Рис. 2. Динамика подводимой ( $W_{in}$ ) и отводимой ( $W_{out}$ ) мощностей в наиболее напряженном ТВС. В момент 2300 с переход от пузырькового кипения к пленочному в верхней части ТВС ( $W_{in} > W_{out}$ )

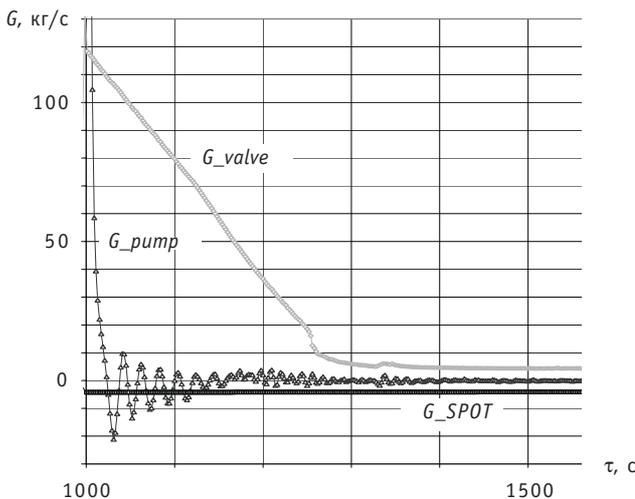


Рис. 3. Динамика расходов при течи в баке:  $G_{valve}$  – расход течи;  $G_{SPOT}$  – расход подпитки;  $G_{pump}$  – расход через группу ЦН1. В момент 1310 с уровень жидкости в подъемной части гидрозатвора достигает верхнего среза Ак3

Рис. 2. Динамика подводимой ( $W_{in}$ ) и отводимой ( $W_{out}$ ) мощностей в наиболее напряженном ТВС. В момент 2300 с переход от пузырькового кипения к пленочному в верхней части ТВС ( $W_{in} > W_{out}$ )

Расчетный сценарий аварии представлен в табл. 2. Производительность системы подпитки бака СПОТ (начальная) 4,2 кг/с. Патрубок подпитки бака расположен на верхней отметке, на периферии бака. Таким образом, направление струи жидкости от СПОТ не попадает на активную зону и направлено по стенке бака вниз к сечению течи. Подпитка не компенсирует расход течи (максимум 120 кг/с) и не влияет на динамику испарения жидкости из зоны. На рисунках 2–6 представлены результаты расчетов. Момент 1000 с – начало аварии. Итоговые расчетные результаты сведены в табл. 3.

Представленные результаты показали, что интервал времени снижения уровня до верхнего среза корзины Ак3 равен 130 с от начала течи. В этот момент остаточная мощность тепловыделения составляет около 2,7% от номинальной тепловой мощности 18 МВт, максимальная температура в баке (над зоной) 67°C, в нижнем коллекторе (под зоной) 71°C. Далее через 40 с начинается объемное кипение в ТВС.

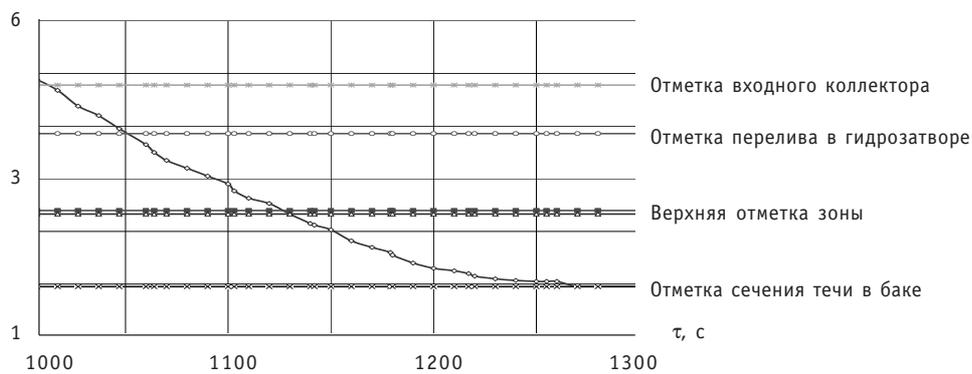


Рис. 4. Динамика снижения уровня при течи в баке

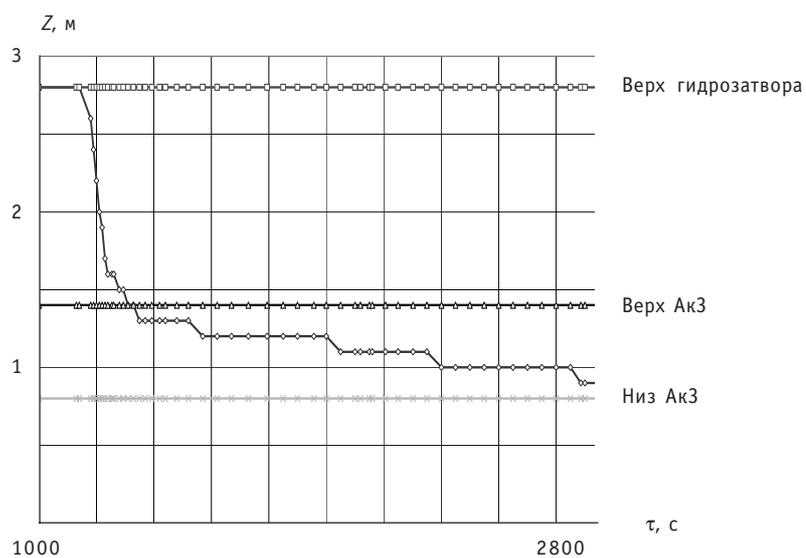


Рис. 5. Динамика снижения уровня в подъемной части гидрозатвора при течи в баке

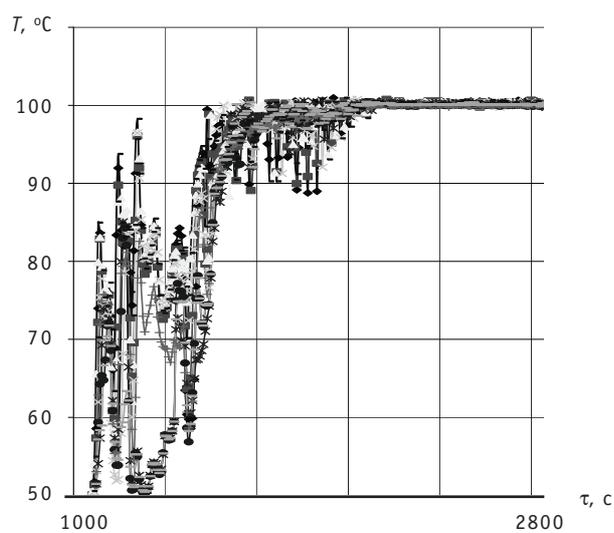


Рис. 6. Динамика температуры жидкости в ТВС различных групп на верхней отметке Ак3

**Динамика осушения бака при течи без запуска душирующего устройства СПОТ (запроектная авария)**

τ, с	Уровень в баке, м	Уровень в подъемной части гидрозатвора, м	Событие
1000	5,0	3,8	Начало течи
1130	2,33	3,8	Момент достижения уровня в баке верхней отметки Ак3
1170			<b>Начало объемного кипения в ТВС</b>
1270	0,95	2,5	Момент достижения уровня в баке сечения течи
1310	0,95	2,33	Момент достижения уровня в гидрозатворе верхней отметки Ак3
2000	0,95	2,13	Снижение уровня в гидрозатворе на 0,2 м ниже верхней отметки Ак3. Пузырьковый режим кипения по всей высоте зоны
2280	0,95	2,05	Снижение уровня в гидрозатворе на 0,3 м ниже верхней отметки Ак3. <b>Начало перегрева пара и оболочки на верхней отметке ТВС</b>
2450	0,95	1,93	Снижение уровня в гидрозатворе на 0,4 м ниже верхней отметки Ак3. Достижение температуры оболочки на выходе в ТВС 200°C
3100	0,95	1,83	Снижение уровня в гидрозатворе на 0,1 м выше нижней отметки Ак3. <b>Достижение температуры оболочки на выходе в ТВС 600°C</b>

В момент времени 27 с от начала аварии уровень жидкости в баке ( за пределами корзины Ак3) опускается и достигает сечения течи, максимальная температура в баке (над Ак3) достигает 99°C, а в нижнем коллекторе (под зоной) 88°C.

Момент закипания в ТВС соответствует 170 с (три минуты) от начала аварии. Процесс кипения в ТВС имеет две стадии:

- стадия объемного кипения в зоне с сохранением температуры пара и оболочки в пределах 104°C длительностью процесса 1110 с (18,5 мин);
- стадия перегрева пара и разогрева оболочки вследствие осушения и снижения теплоотдачи длительностью 13 мин до момента достижения максимума температуры оболочки ТВС 600°C.

Таким образом, в данной ситуации имеется запас по времени не более 20-ти минут для запуска душирующего устройства СПОТ и залива зоны с последующим подавлением кипения и снижением уровня температуры оболочки

**БОЛЬШАЯ ТЕЧЬ НА НИЖНЕЙ ОТМЕТКЕ БАКА С УЧЕТОМ ЗАПУСКА ДУШИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА СПОТ**

При большой течи в баке и автоматическом запуске системы душирующего устройства СПОТ с расходом около 4 кг/с имеют место следующие процессы:

- быстрое снижение уровня жидкости до верхней отметки Ак3 в течение 120 с;
- прогрев жидкости в Ак3 до точки закипания и начало объемного кипения;
- подавление кипения за счет залива жидкостью (20°C) от душирующего устройства СПОТ;
- снижение температур оболочки ТВС и теплоносителя до 25–30°C в течение 20-ти минут.

Таблица 4

**Сценарий аварии**

Событие	Момент, с	Событие	Момент, с
Номинальный режим	0 – 997	Остановка всех ЦН1	1000 – 1007
Раскрытие течи	997 – 1000	Запуск подпитки бака и душа	1020
Сброс мощности	1000		

Таким образом, перегрев оболочек ТВС ликвидируется системой СПОТ в течение выработки ее объемов (40 м<sup>3</sup>).

Расчетный сценарий аварии представлен в табл. 4. Рассматривается течь на нижнем сварном шве бака (отметка 1 м от дна) сечением 200 см<sup>2</sup>. Совместная производительность системы подпитки бака от СПОТ и душирующего устройства (начальная) составляет 8,4 кг/с. Расход холодной жидкости от душирующего устройства (4 кг/с) с температурой 20°С равномерно распределяется над АкЗ с верхней отметки бака. Часть полезной доли расхода на зону при этом теряется и уходит в периферийную часть бака (в течь). Расчеты проводились с целью оценить возможность достижения температуры ТВС 600°С. На рисунках 7–9 представлены результаты численных расчетов.

Представленные результаты показали, что интервал времени снижения уровня до верхнего среза корзины АкЗ составляет 130 с от начала течи, максимальная температура в баке (над зоной) – 69°С, в нижнем коллекторе (под зоной) 69°С. В момент времени 287 с от начала аварии уровень жидкости в баке (за преде-

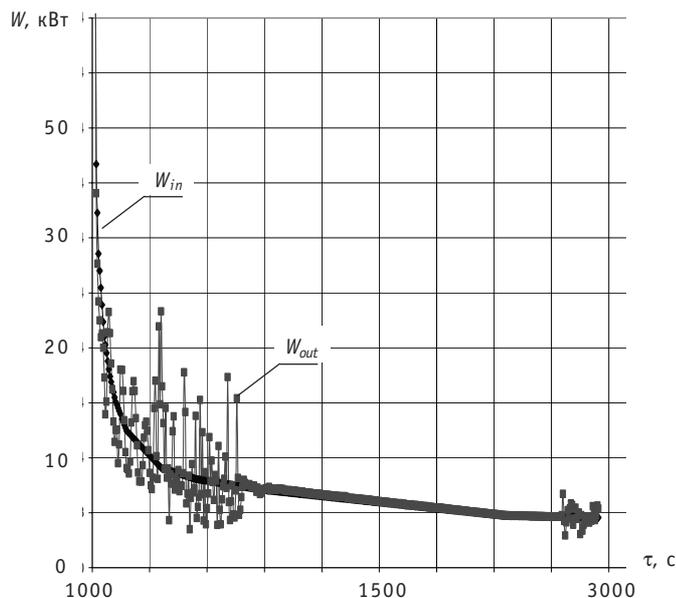


Рис. 7. Динамика подводимой ( $W_{in}$ ) и отводимой ( $W_{out}$ ) мощности в наиболее напряженном канале

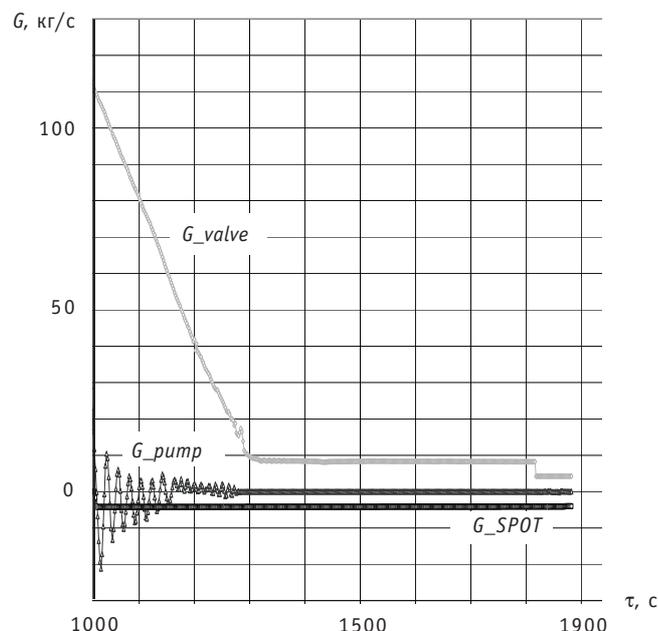


Рис. 8. Динамика расходов при течи в баке:  $G_{valve}$  – расход течи;  $G_{SPOT}$  – расход подпитки;  $G_{pump}$  – расход через группу ЦН1

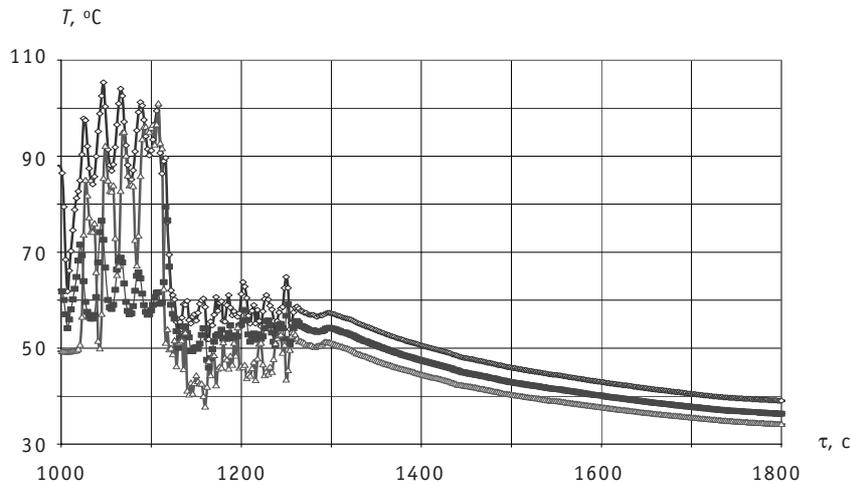


Рис. 9. Динамика температуры жидкости и оболочки в ТВС максимальной мощности:  $T_{w\_max}$  (◇) – оболочки в среднем сечении;  $T_{bot\_max}$  (■) – на нижней отметке;  $T_{top\_max}$  (△) – на верхней отметке. В момент 1120 с происходит подавление кипения притоком холодной жидкости от СПОТ

лами корзины Ак3) опускается, достигая сечения течи, максимальная температура в баке (над Ак3) достигает 55°C, а в нижнем коллекторе (под зоной) 53°C.

При непрерывной (от начала аварии) работе системы дулирующего устройства с расходом 4 кг/с активная зона удерживается в температурном режиме в пределах 100°C с последующим монотонным снижением до температуры жидкости в баках СПОТ.

### МАЛАЯ КОНТРОЛИРУЕМАЯ ТЕЧЬ В БАКЕ

Условие контролируемости течи системой подпитки определяется дифференциальным уравнением динамики течи

$$\rho F_6 dH = (G_{\text{СПОТ}} - \rho \mu F_T \sqrt{2gH}) d\tau \text{ при начальном условии } \tau = 0, H = H_1,$$

где  $F_6$  – площадь поверхности бака;  $F_T$  – сечение течи;  $\mu = 0,62$  – коэффициент расхода при истечении из бака.

Анализ уравнения показывает, что существуют два критических значения сечения течи:

- $G_{\text{СПОТ}} = \rho \mu F_T \sqrt{2gH_1}$ ,  $F_T = 0,00173 \text{ м}^2$  (14 см<sup>2</sup>) – снижение уровня от номинального до 5,3 м не происходит;

- $G_{\text{СПОТ}} = \rho \mu F_T \sqrt{2gH_2}$ ,  $F_T = 0,00204 \text{ м}^2$  (20 см<sup>2</sup>) – снижение уровня останавливается на отметке верхнего среза Ак3 2,3 м. Подпитка бака системой СПОТ уравновешивается гравитационным расходом истечения.

Таким образом, сечение течи менее 20 см<sup>2</sup> не приводит к оголению зоны при запуске системы СПОТ (малая контролируемая течь).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные расчетные результаты подтверждают повышение технической надежности после выполнения модернизации конструкции, основанной на использовании принципов пассивной безопасности модернизированного проекта РУ ВВР-ц (ИВВ.10М) бассейнового типа при течах из бака. Показаны последствия постулируемых гипотетических аварий и важность использования дулирующего устройства. Подтверждено, что принятые при модернизации РУ конструктивные

меры (установка гидрозатвора на сливном тракте непосредственно в баке РУ в сочетании с верхним размещением подвода теплоносителя к активной зоне) значительно повысят степень безопасности аппарата при всех рассматриваемых вариантах аварий.

### **Литература**

1. *Кочнов О.Ю.* Расчетно-экспериментальный анализ аварийного расхолаживания ИС РУ ВВР-ц при обесточивании циркуляционных насосов // *О.Ю. Кочнов, В.В. Сергеев, А.А. Казанцев* // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – №3. – С.77-89.
2. TRAC-PFI/Mod2. Theory manual. Los Alamos National Laboratory, 1993.
3. *Кузнецов Ю.Н.* Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. Об инцидентах на исследовательских ядерных установках мира (по данным IRSRR МАГАТЭ) // Информационный бюллетень. – 2008. – Вып. №2. – Димитровград. – С. 11.

Поступила в редакцию 19.05.2011

**УДК 621.039.51**

*Investigation of Consequences the Leak from Tank of VVR-c Reactor (IBB.10M) after Design Modernization* \V.V. Sergeev, O.Uy. Kochnov, A. A. Kazantsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 4 tables, 9 illustrations. – References, 4 titles.

In the paper are presented the calculation results of transient cooling of reactor facility (RF) in the natural circulation mode under anticipated accident with coolant leak that is postulated by safety analysis report (SAR). The postulated initial even of accident is leak appearance from reactor tank that bring to fast level decreasing into tank. It was shown that used at modernization of RF design steps (setting the hydraulic lock at down-flow pipeline from RF directly into tank in combination with upper positioning of coolant inlet to core) significantly increase the degree of reactor facility safety at considered maximal design accident. Calculations were performed based on TRAC code. International thermal hydraulic network code TRAC was designed for the safety analysis of water-cooled NPP.

**УДК 539.1.07; 621.384.8**

*Panoramic Plasma-Optical Mass Separation not Monoenergetic and Multiply Charged Ions* \V.M. Bardakov, Vo Nhu Dan, N.A. Strokin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 11 pages, 4 illustrations. – References, 14 titles.

Proposed method and installation, extending the functionality of the plasma separators that improve their performance and provides a panoramic multi-component separation of the plasma flow to the masses. On the example of the spent nuclear fuel shows features plasma-separation of a mixture containing multiply charged ions.

**УДК 621.039.548: 669.2**

*The Synthesis and Physicochemical Investigation of Gadolinium Hydroxide Powders for Fuel Pellets Alloying* \L.V. Myakishcheva, V.Y. Lopatin, V.S. Panov, I.A. Vlasovec; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 6 titles.

This research is devoted to obtaining of fine Gd(OH)<sub>3</sub> powders as small alloying additive to UO<sub>2</sub> for fuel pellet enhancement.

**УДК 621.039.5**

*Program for Three-Dimensional Numerical Computation of Thermal and Electrical Properties of a Multicell Thermionic Fuel Element for the Direct Energy Conversion NPP* \M.A. Polous, V.I. Yarygin, E.G. Vinogradov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 8 illustrations. – References, 11 titles.

The existing COMSOL finite element analysis code has been modified to calculate the electro-thermophysical properties of a thermionic fuel element with a complex geometry of structural components for the new generation direct energy conversion NPP on a basis of its three-dimensional mathematical model using the discreet experimental data on the current-voltage characteristics of a thermionic converter.