

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АВАРИЙНОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ ИС РУ ВВР-Ц ПРИ ОБЕСТОЧИВАНИИ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ НАСОСОВ

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

\* НИФХИ им. Карпова, г. Обнинск

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

\*\*\* ЭНИМЦ «Моделирующие системы», г. Обнинск



На основе эксперимента, выполненного на исследовательском реакторе бассейнового типа ВВР-ц в течение эксплуатации при аварийном расхолаживании, и данных, полученных на реакторе ИС РУ РБТ-6, проведены пост-тестовые расчеты динамики расхолаживания установки при обесточивании циркуляционных насосов. Представлены результаты расчетов расхолаживания РУ ВВР-ц на естественной циркуляции, начиная с предельной мощности. Расчеты выполнялись по международному теплогидравлическому коду TRAC, предназначенному для анализа технической безопасности водоохлаждаемых ЯЭУ.

**Ключевые слова:** экспериментальный реактор бассейнового типа, ВВР-ц, теплогидравлические расчеты реактора, расхолаживание, проектная авария, техническая безопасность.

**Key words:** pool type research reactor, VVRC, thermal hydraulic calculations of a reactor, shut down heat cooling, design accident, technical safety.

Надежность отвода избыточного тепла от активной зоны исследовательских РУ бассейнового типа в условиях потери электропитания циркуляционных насосов является одним из важнейших условий их технической безопасности. Важность проблемы связана с наличием практически открытой границы между первым контуром и помещениями реакторной установки. Таким образом, возрастает значение первого барьера безопасности – топливной композиции и второго барьера – оболочек ТВС.

Особенности компоновки активной зоны (АЗ) реактора ВВР-ц и первого контура.

- Применение специального реакторного высокотеплопроводного алюминиевого сплава САВ для оболочек ТВС, имеющего предельно допустимую температуру 200°C.

- Использование кольцевой конструкции твэлов с максимальным соотношением поверхности к объему (двухстороннее охлаждение) и толщиной топливного слоя 1,1 мм.

© О.Ю. Кочнов, В.В. Сергеев, А.А. Казанцев, 2010

- Применение специального вида топливной композиции – двуокиси урана в алюминиевой матрице с высоким коэффициентом теплопроводности (до 150 Вт/м/К). Выбор данного материала сводит тепловую инерцию твэлов к минимуму. Максимальная температура топлива для стационарных и переходных режимов не превышает 100°C.

- При охлаждении ИС РУ течение охлаждающего теплоносителя (вода под давлением 1,3 бар) происходит сверху вниз по активной зоне. Циркуляционные насосы первого контура (ЦН1) расположены под зоной на горячей стороне (до входа в теплообменники). Соответственно, в РУ ВВР-ц при остановке насоса ЦН1 в течение первой минуты происходит смена направления потока, переход опускного течения в подъемное и опрокидывание естественной циркуляции. Переход расхода через нулевое значение является первой критической точкой с точки зрения безопасности.

- Размещение теплообменников на нижней отметке первого контура (под активной зоной). В результате при полной остановке ЦН1 и работе насосов второго контура в номинальном режиме происходит полная остановка естественной общеконтурной циркуляции: провоцирующее движение горячего теплоносителя вверх по АЗ сводится на нет забросом холодной жидкости из теплообменников в отводящую магистраль к баку РУ. Следует заметить, что в некоторых проектах ИС РУ (в частности, ИВВ-2м) рассматриваемая тенденция ЕЦ исключена конструктивно за счет верхнего расположения теплообменников.

- Важнейшей системой пассивной теплогидравлической безопасности ИС РУ является наличие бассейна (бака РУ) с большим запасом холодного теплоносителя. В частности, в ВВР-ц объем жидкости в баке составляет около 20 м<sup>3</sup>, в то время как объем теплоносителя в проточной части активной зоны – 0,1 м<sup>3</sup>. Соответственно, даже при прекращении общеконтурной естественной циркуляции проявляется второй механизм охлаждения – местная естественная циркуляция в баке РУ: по горячим ТВС – подъемное течение, по холодным ТВС, межкассетному пространству и каналам СУЗ – опускное. В результате интервал времени до закипания теплоносителя в АЗ составляет более четырех часов.

- Вторым принципом теплогидравлической безопасности РУ ВВР-ц является дублирование ЦН1 и использование независимого источника для питания одного насоса из пяти параллельных при эксплуатации на номинальном режиме (используется аккумуляторная подстанция для резервного питания).

- К дополнительным системам безопасности ИС РУ относятся системы принудительной вентиляции шахты РУ и помещений первого контура, обеспечивающей съем тепла до 100 кВт, и подпитки бака РУ.

### **ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО АВАРИЙНОМУ РАСХОЛАЖИВАНИЮ НА РУ ВВЭР-Ц И РБТ-6**

На РУ ВВР-ц первоначальной компоновки был проведен эксперимент с полной остановкой насосов второго контура на мощности 14,5 МВт с последующим сбросом мощности и остановкой четырех ЦН первого контура из пяти. Целью эксперимента [1] была проверка возможности

- аккумуляирования выделяемой энергии остаточного тепловыделения в баке РУ и первом контуре в течение нескольких часов начиная от остановки ЦН2 при сбросе мощности;

- пассивного отвода тепла от теплоносителя в баке и первом контуре за счет вынужденной и естественной вентиляции шахты РУ и помещений первого контура в течение суток.

На реакторе ВВР-ц в июле 1975 г. был проведен эксперимент по определению разогрева воды первого контура при отключении насосов второго контура. Условия эксперимента были следующие: реактор работал на мощности 14,5 МВт; температура воды первого контура на входе в активную зону составляла 45°C, на выходе 52,8°C. При работе реактора на мощности 14,5 МВт были отключены насосы второго контура, а через 30 секунд после этого реактор был заглушен от кнопки сброса аварийной защиты. В системе охлаждения в работе оставался один насос первого контура (ЦН1), расход воды в контуре составлял 360 м³/ч. Далее велось измерение температуры воды на выходе из активной зоны. Через 30 секунд после заглушения реактора температура воды на выходе из активной зоны повысилась до 55°C, затем через 30 с снизилась до 51°C.

Максимальная величина температуры воды на выходе из активной зоны при заглушении реактора с мощности 14,5 МВт составила 57,5°C через семь часов после момента остановки. Затем температура постоянно снижалась. В первом контуре циркуляция сохранилась (работал один насос – 360 м³/ч). Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Последовательность событий и результаты измерений в эксперименте**

Момент времени, событие	$W$ , МВт	$G_1$ , кг/с	$G_2$ , кг/с	$T_{\text{вх АЗ}}$ , °C	$T_{\text{вых АЗ}}$ , °C
Номинальный уровень мощности (стационар)	14,5	448	Номинальный	45	52,8
0 с – останов ЦН2	14,5	448	0	–	–
30 с – сброс мощности и останов четырех ЦН1	Остаточное тепловыделение	100	0	–	55
60 с – достигнут минимум температуры	–	100	0	–	51
7 ч – максимум $T_{\text{вых АЗ}}$ ; далее снижение	–	100	0	–	57,5

Рассматриваемый процесс приближенно описывается следующим дифференциальным уравнением баланса подводимой мощности (остаточного тепловыделения) и отводимой (к окружающей среде в условиях вентиляции) мощности по точечной модели:

$$M \cdot C_p \cdot \Delta T = W(\tau) \cdot \Delta \tau - S \cdot \alpha \cdot (T - T_{\text{возд}}), \quad (1)$$

где  $M$  – общая масса теплоносителя в баке и первом контуре;  $W(\tau)$  – мощность остаточного тепловыделения в АЗ;  $S$  – суммарная поверхность бака РУ, двух рабочих ТО и трубопроводов первого контура;  $\alpha$  – средний коэффициент теплоотдачи к окружающей среде в условиях совместных вынужденной и естественной конвекции воздуха;  $T_{\text{возд}}$  – средняя температура окружающего воздуха в шахте РУ и помещениях первого контура.

Физический смысл уравнения (1) состоит в следующем. В течение нескольких часов от начала расхолаживания основная доля тепловыделения идет на прогрев теплоносителя первого контура, объем которого в 340 раз превышает объем жидкости в активной зоне (100 л). На этом принципе основана концепция пассивной безопасности при аварийном расхолаживании реакторов бассейнового типа. В дальнейшем мощность остаточного тепловыделения становится сравнимой с мощностью теплоотвода от первого контура через систему вентиляции к окружающе-

му воздуху (порядка 80 кВт). Подвод мощности вначале превышает отвод, что приводит к росту температуры. Затем он уравнивается теплоотводом к окружающей среде (точка максимума), и далее при постоянном снижении мощности остаточного тепловыделения отвод тепла становится больше подвода, что приводит к постоянному снижению температуры теплоносителя первого контура.

В таблицах 2 и 3 представлены проектные данные по объемам теплоносителя и поверхностям корпусных элементов первого контура модернизированной компоновки ВВР-ц.

Таблица 2

**Распределение массы теплоносителя в первом контуре**

Элемент контура	Масса теплоносителя, кг
Бак РУ	18485
Проточная часть АЗ	107
Обвязка первого контура	15805
Первый контур в целом	34400

Таблица 3

**Распределение поверхностей теплообмена элементов первого контура с окружающей средой**

Параметр	Значение
Боковая поверхность бака РУ новой компоновки, м <sup>2</sup>	41
Поверхность двух ТО новой компоновки, м <sup>2</sup>	26
Суммарная поверхность трубопроводов первого контура, м <sup>2</sup>	79
Суммарная поверхность бака РУ, двух ТО и трубопроводов первого контура, м <sup>2</sup>	146

Второй эксперимент, имеющий отношение к данному материалу, был проведен на ИС РБТ-6 (НИИАР) [2] сходной компоновки. Целью эксперимента являлся анализ опрокидывания циркуляции при полной остановке ЦН1 и последствий с точки зрения безопасности. Результаты экспериментов и последующего расчета по международному коду RELAP5/mod 3.2, проведенных в НИИАР, представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Динамика температуры теплоносителя в верхней части энергонапряженной ТВС при развитии внутризонной ЕЦ по экспериментальным данным и расчету НИИАР**

Параметр	Эксперимент	Расчет
Температура теплоносителя в номинале, °С	45	45
Температура теплоносителя в точке максимума при опрокидывании, °С	59	69
Интервал времени достижения максимальной температуры, с	Менее 60	Менее 60

Момент опрокидывания циркуляции приближенно [3] можно выразить уравнением гидродинамики контура

$$\frac{dG}{d\tau} = \frac{(H \pm H_{\text{ЕЦ}} - \Delta P_{\text{ТР}})}{(L/F)_{\text{ЭФФ}}}, \quad (2)$$

где  $G$  – мгновенное значение расхода в контуре;  $H$  – напор насоса;  $H_{\text{ЕЦ}}$  – полезный напор естественной циркуляции;  $\Delta P_{\text{ТР}}$  – гидравлическое сопротивление контура;  $(L/F)_{\text{ЭФФ}}$  – эффективное отношение длины контура к проходному сечению (инерционный член).

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ ИС РУ ВВР-Ц ПРИ ОБЕСТОЧИВАНИИ ПО КОДУ TRAC НА ПАРАМЕТРАХ ЭКСПЕРИМЕНТА

Численные расчеты рассматриваемой аварии на РУ проводились по коду TRAC [4–6] в нестационарной постановке на основе расчетной схемы первого и второго контуров (рис. 1) с учетом модернизации компоновки первого контура.

В таблице 5 представлены интегральные параметры аппарата.

В целом расчетная схема является одномерной, за исключением бака реактора, который представлен в виде модели двумерного пористого тела. Проточная часть активной зоны изображена в виде системы параллельных одномерных каналов. Рассматриваются пять групп ТВС в соответствии с их расстановкой по радиусу зоны, одна ТВС – максимальной мощности (во втором ряду), одна ТВС – минимальной мощности (в пятом ряду), имеется групповой канал охлаждения СУЗ и групповой канал межкассетных протечек.

Математическая модель кода 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 неомогенном приближении.

Для основных элементов первого контура (бак РУ, теплообменники, трубопроводы) учитываются потери тепла к окружающей среде за счет вентиляции (на рис. 1 не показаны). Имитаторы течи на баке № 400-403 и на ЦН1 № 103-106 в данном материале не используются.

Для корректного учета уходящего тепла в систему вентиляции от оборудования и трубопроводов на основе опытных данных решалась обратная задача определения среднего коэффициента теплоотдачи к воздуху в помещениях первого контура и определения средней температуры воздуха на основе модельного урав-

Таблица 5

#### Интегральные параметры РУ ВВР-ц

Параметр	Значение
Эксплуатационная мощность, МВт	10–18
Предельный расход по первому контуру, м <sup>3</sup> /ч (кг/с)	1500 (417)
Рабочий диапазон температуры теплоносителя на входе в АЗ, °С	48–58
Количество ТВС (пять рядов по радиусу)	70
Номинальный перепад высотных отметок первого контура, м	10,7
Номинальный уровень теплоносителя в баке, м	5,3
Номинальное давление на верхней отметке АЗ, бар	1,3
Температура насыщения на верхней отметке АЗ, °С	107
Коэффициент неравномерности тепловыделения по ТВС	1,3

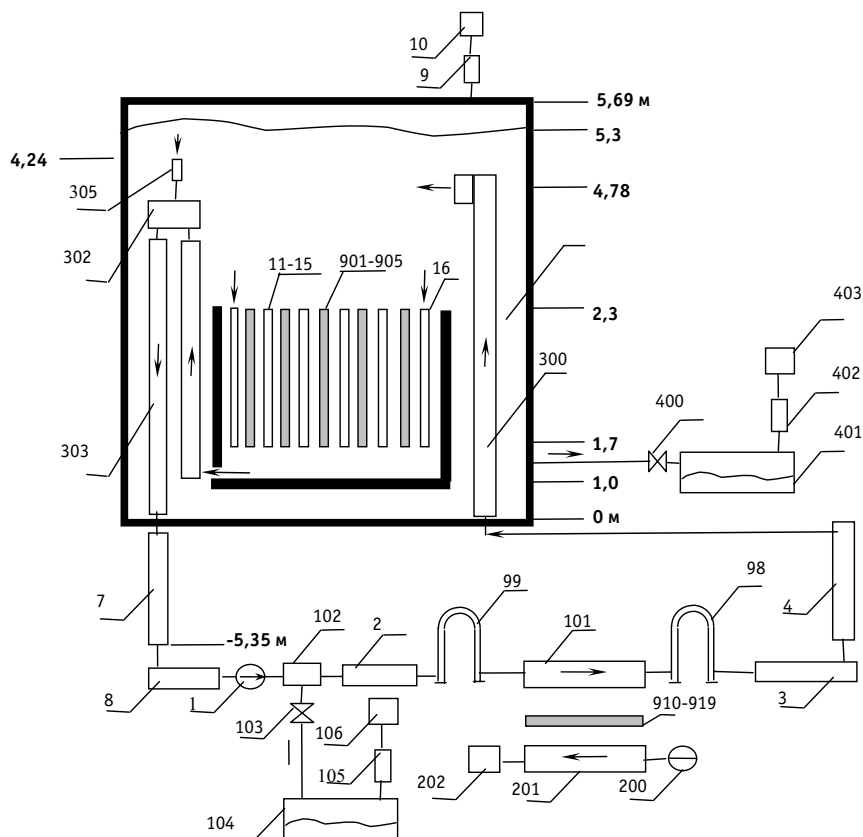


Рис.1. Расчетная схема первого контура РУ для моделирования проектных аварий (обозначения в табл. 6)

Таблица 6

**Список обозначений к расчетной схеме**

Позиция	Обозначение	Тип элемента в коде
1	Группа управляемых ЦН (пять параллельных)	PUMP
102	Тройник	PLENUM
103, 400	Управляемый клапан-имитатор течи	VALVE
104, 401	Бокс сбора дренажа первого контура	VESSEL
105, 9, 402	Воздуховод	PIPE
106, 403	Воздушный компенсатор давления (атмосфера)	BREAK
2	Нагнетательный тракт	PIPE
99, 98	Гидрозатвор теплообменника	PIPE
101	Межтрубное пространство теплообменников (2 параллельных)	PIPE
3, 4	Подводящий тракт к баку РУ	PIPE
300	Подводящие трубы в баке РУ (два параллельных)	PIPE
100	Бак РУ	VESSEL
11-15	Проточная часть пяти групп ТВС (по радиусу А3)	PIPE
16	Групповой тракт межкассетных протечек и охлаждения СУЗ	PIPE
303	U-образный гидрозатвор	PIPE
302	Тройник (разворотная часть гидрозатвора)	PLENUM
304	Канал воздухоудаления	PIPE
7, 8	Подводящий тракт к ЦН	PIPE
10	Воздушный компенсатор давления бака (атмосфера)	BREAK
200	Группа управляемых ЦН второго контура	FILL
201	Трубное пространство теплообменников (по 2 контуру)	PIPE
202	Компенсатор давления по второму контуру	BREAK
901-905	ТВС (5 групп по радиусу А3)	SLAB
910	Теплообменные трубы теплообменников	ROD

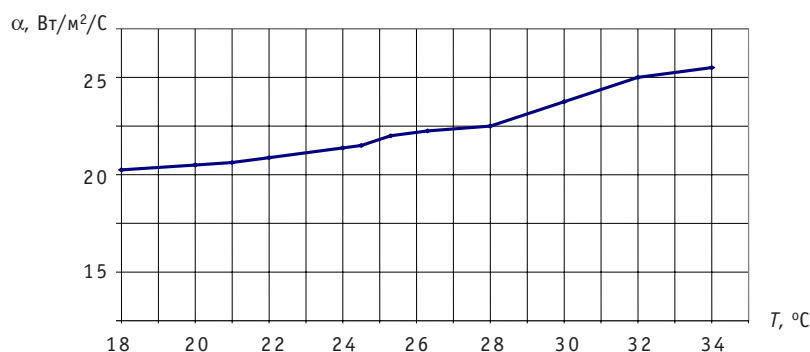


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи к воздуху от температуры воздуха в вентиляционной системе, удовлетворяющая максимуму температуры в эксперименте

нения (1). Задача решалась на этапе предварительной обработки эксперимента и настройки модели.

Для решения обратной задачи был выполнен расчет прямой задачи расхолаживания по уравнению (1) для оцененного диапазона вариантов при различных исходных данных по температуре окружающей среды и коэффициенту теплоотдачи к воздуху.

Результаты решения задачи представлены на рис. 2. Решение обратной задачи в силу отсутствия дополнительных условий эксперимента (температуры воздуха в помещениях первого контура) – многозначное, что приводит к необходимости ее выбора.

Результаты повторного прямого численного расчета данной аварии по коду TRAC представлены на рис. 3, 4. Номинальная мощность соответствовала 14,5 МВт. Система вентиляции охлаждает первый контур с заданным коэффициентом теплоотдачи 20 Вт/(м²С). Температура воздуха в шахте РУ и помещениях первого контура полагалась 26,5°C (постоянная). Эти параметры получены из решения обратной задачи (рис. 2). Сценарий аварии представлен в табл. 7.

Момент пересечения кривых на рис. 3 соответствует максимуму температуры теплоносителя в первом контуре. Из рисунка 3 видно, что подводимая мощность к РУ ( $W$ ) и отводимая от РУ ( $W_{out}$ ) практически совпадают.

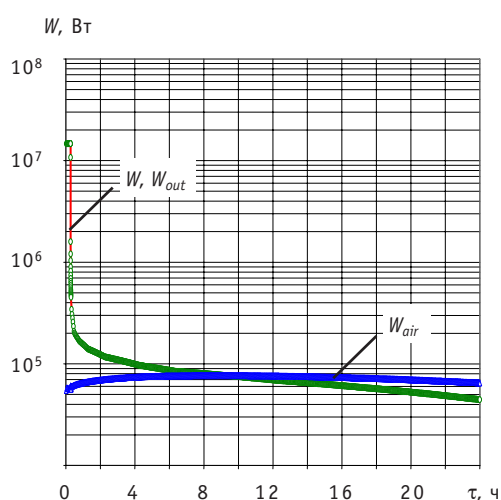


Рис. 3. Динамика подводимой мощности к РУ ( $W$ ), отводимой от РУ ( $W_{out}$ ) и от первого контура к воздуху за счет вентиляции ( $W_{air}$ )

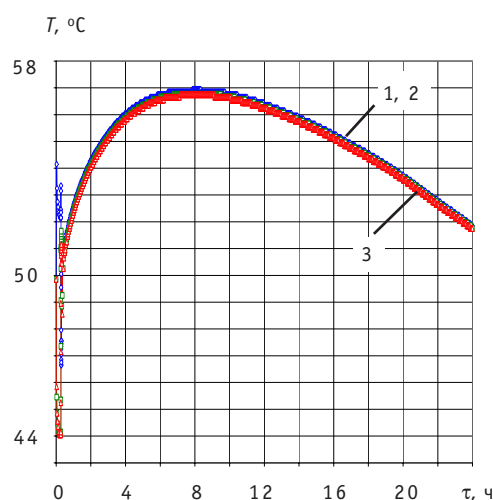


Рис. 4. Динамика температур: 1 – на выходе из АЗ; 2 – на выходе из двух параллельных рабочих теплообменников; 3 – на входе в АЗ

Таблица 7

**Расчетный сценарий аварии**

Момент времени, событие	$W$ , МВт	$G_1$ , кг/с	$G_2$ , кг/с	$T_{\text{вх АЗ}}$ , °С	$T_{\text{вых АЗ}}$ , °С
970–977 с – останов ЦН2	14,5	422	283–0	45	52,8
1000 с – сброс мощности, останов четырех из пяти ЦН1	Остаточное	422–82	0		

Таблица 8

**Сравнение экспериментальных и расчетных результатов**

Параметр	Опытные данные	Расчетные данные TRAC	Расчет по точечной модели (1)
Максимальная температура теплоносителя в первом контуре, °С	57	57,1	55,6
Момент достижения максимума температуры от начала аварии, ч	7	7,6–8,1	7,2

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА АВАРИИ С ПОЛНЫМ ОБЕСТОЧИВАНИЕМ ЦН1 И ЦН2 ПО КОДУ TRAC С НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ 18 МВт**

Проводились расчеты расхолаживания РУ при полном обесточивании на предельной мощности РУ ВВР-ц и в более жестких условиях:

- номинальная мощность – 18 МВт, после 30 с переходит на кривую остаточного тепловыделения;
- начальная температура на входе в АЗ 49°С;
- начальная температура на выходе из АЗ 59°С;
- коэффициент теплоотдачи к воздуху 15 Вт/(м<sup>2</sup> К);
- температура воздуха 30°С;
- расход по первому контуру  $G_1$ , 420 кг/ постоянный;
- расход по второму контуру  $G_2$ , 283 кг/с в момент 0 с останов ЦН2.

Результаты расчетов представлены на рис. 5–8. На всех графиках момент 1000 с соответствует сбросу мощности.

Результаты показывают, что в момент 27 с после сброса мощности происходит опрокидывание циркуляции в первом контуре: течение в зоне снизу вверх. Данный момент является первой критической точкой: при переходе общеконтурного расхода через ноль температура теплоносителя и оболочек ТВС в АЗ достигает максимума. Однако условие начала объемного кипения при этом не достигается. Температура теплоносителя в наиболее горячем ТВС составляет 93,1°С (на верхней отметке), что ниже температуры насыщения 107°С (номинальный уровень жидкости над зоной составляет 3 м). Температура оболочки на короткое время достигает температуры насыщения.

В дальнейшем расход ЕЦ в первом контуре сохраняется стабильным на уровне 10–12 кг/с в течение 24 ч. Температура теплоносителя после момента опрокидывания сначала снижается, что связано с развитием устойчивой естественной циркуляции, а затем медленно увеличивается. Темп прогрева контура примерно соответствует варианту с работой одного ЦН1. В момент 15,3 ч (вторая критическая точка) от начала расхолаживания температура теплоносителя в наиболее горячем канале достигает максимума 75,7°С (на верхней отметке). При этом расход ЕЦ в первом контуре составляет 11 кг/с. В дальнейшем максимальная температура жидкости в горячем канале начинает медленно снижаться.



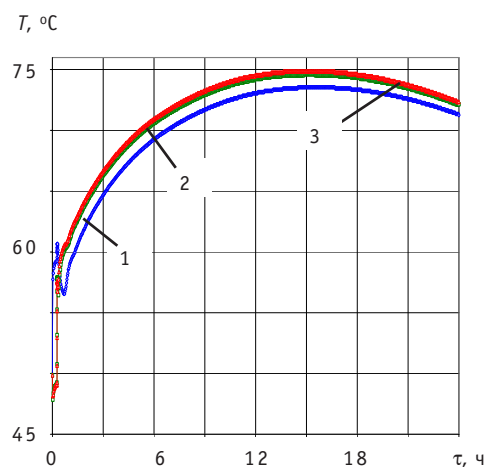


Рис. 5. Динамика температур теплоносителя на выходе из АЗ, на выходе из двух параллельных рабочих теплообменников и на входе в АЗ: 1 – температура на выходе из бака РУ (по номинальной схеме циркуляции); 2 – температура на выходе из теплообменников; 3 – температура во входном коллекторе бака

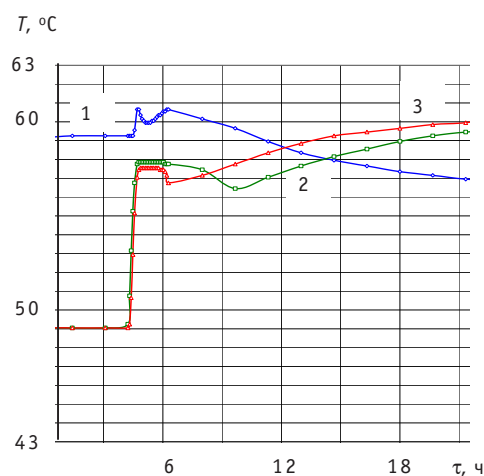


Рис. 6. Динамика температур теплоносителя на выходе из АЗ, на выходе из двух параллельных рабочих теплообменников и на входе в АЗ (фрагмент рис. 5)

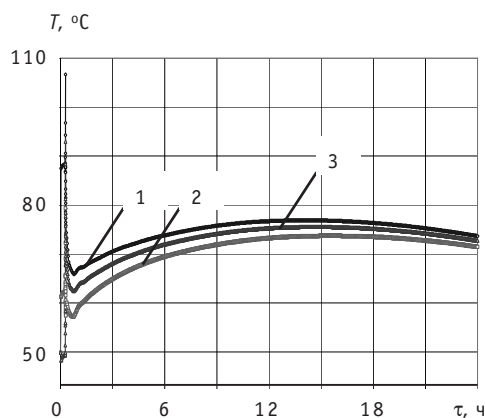


Рис. 7. Динамика температур теплоносителя и оболочки в горячем канале: 1 – температура теплоносителя в центре АЗ; 2 – температура теплоносителя в горячем канале на нижней отметке зоны; 3 – температура теплоносителя на верхней отметке

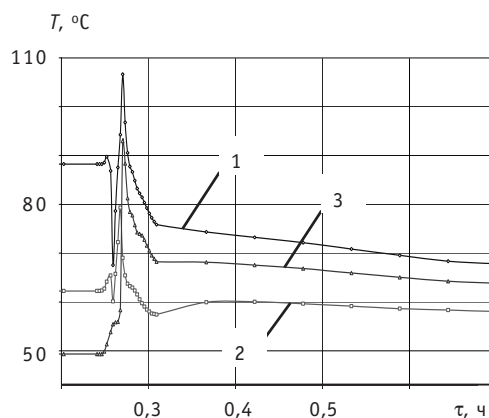


Рис. 8. Динамика температур теплоносителя и оболочки в горячем канале (фрагмент рис. 7)

Таким образом, при наличии вынужденной циркуляции с расходом 80 кг/с (сверху вниз по АЗ) или естественной с расходом около 10 кг/с (снизу вверх по АЗ) рост температуры теплоносителя в первом контуре примерно одинаков в течение 14 ч. При дальнейшем развитии аварии уровень температуры достигает максимума и монотонно снижается, что говорит о безопасности установки при полном обесточивании.

На рисунке 7 момент 27 с соответствует опрокидыванию циркуляции – первая критическая точка. Максимум температуры теплоносителя в ТВС 92°C. Момент 15,3 ч соответствует уравниванию подводимой и отводимой за счет вентиляции первого контура мощности – вторая критическая точка. Максимум температуры теплоносителя в ТВС 75°C

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ПО КОДУ TRAC АВАРИИ С ЧАСТИЧНЫМ ОБЕСТОЧИВАНИЕМ: ПОЛНЫМ ОБЕСТОЧИВАНИЕМ ЦН1 И РАБОТЕ ЦН2 С НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ 18 МВт

В данном разделе представлены результаты расчета расхолаживания РУ при частичном обесточивании, при котором в момент 30 с происходит сброс мощности и останов всех ЦН1:

- номинальная мощность – 18 МВт, после 30 с переходит на кривую остаточного тепловыделения;
- начальная температура на входе в АЗ 49°C;
- начальная температура на выходе из АЗ 59°C;
- коэффициент теплоотдачи к воздуху 15 Вт/(м<sup>2</sup> К);
- температура воздуха 30°C;
- расход по первому контуру  $G_1$ , 420 кг/с после сброса мощности переходит на ЕЦ;
- расход по второму контуру  $G_2$ , 283 кг/с.

Таким образом, в данном сценарии сохранялся номинальный расход по второму контуру.

Результаты расчетов (рис. 9–12) показывают, что в момент 31 с от сброса мощности происходит опрокидывание циркуляции в первом контуре. Данный момент является первой критической точкой: при переходе общеконтурного расхода через ноль температура теплоносителя и оболочек ТВС в АЗ достигает максимума. Однако условие начала объемного кипения при этом не достигается. Температура в наиболее горячем ТВС составляет 89°C, что ниже температуры насыщения 107°C.

В дальнейшем процесс циркуляции качественно отличается от предыдущего варианта. Расход ЕЦ в первом контуре становится знакопеременным и затухает со временем.

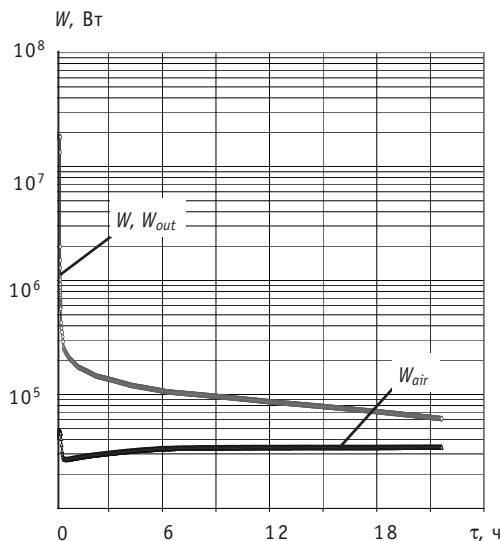


Рис. 9. Динамика подводимой мощности к РУ ( $W$ ), отводимой от РУ ( $W_{out}$ , совпадают) и от первого контура к воздуху за счет вентиляции ( $W_{air}$ )

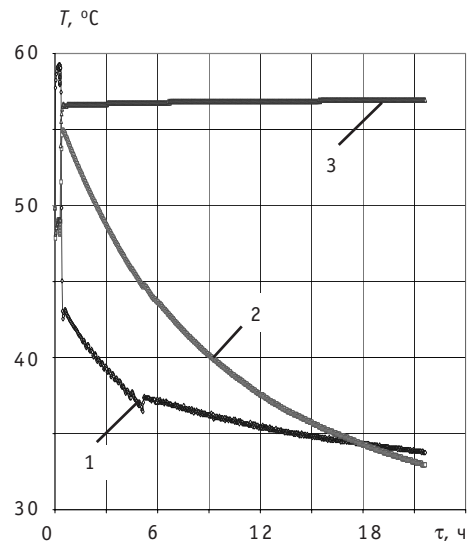


Рис. 10. Динамика температур теплоносителя на выходе из АЗ, на выходе из двух параллельных рабочих теплообменников и на входе в АЗ: 1 – температура на выходе из бака РУ (по номинальной схеме циркуляции); 2 – температура на выходе из теплообменников; 3 – температура во входном коллекторе бака

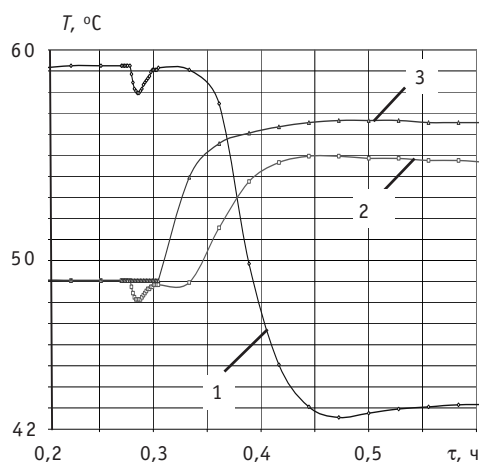


Рис. 11. Динамика температур теплоносителя на выходе из АЗ, на выходе из двух параллельных рабочих теплообменников и на входе в АЗ (фрагмент рис. 10)

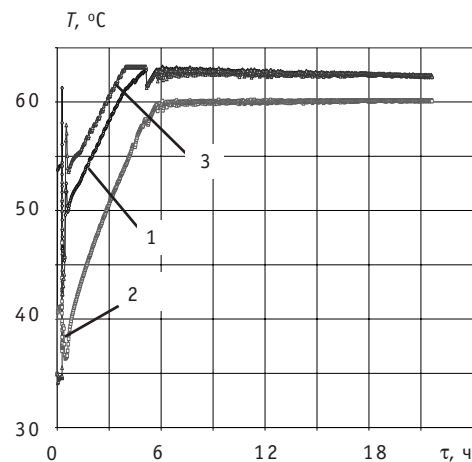


Рис. 12. Динамика температур теплоносителя и оболочки в горячем канале: 1 – температура оболочки в горячем ТВС в центре АЗ; 2 – температура теплоносителя в горячем канале на нижней отметке зоны; 3 – температура теплоносителя на верхней отметке

Нижнее расположение рабочих теплообменников относительно зоны затормаживает развитие естественной циркуляции в первом контуре. С одной стороны, в зоне за счет прогрева жидкости появляется положительный полезный напор, способствующий циркуляции снизу вверх. С другой стороны, происходит заброс охлажденной в теплообменнике части теплоносителя в опускную отводящую магистраль бака, который приводит к торможению естественной циркуляции. Теплообменники работают в данных условиях с избытком отводимой мощности в силу чрезмерного для небольшой мощности остаточного тепловыделения расхода по второму контуру и чрезмерно захлаживают жидкость в отводящей магистрали бака.

В результате максимальная температура теплоносителя в наиболее горячем ТВС через 4,3 ч от начала аварии достигает температуры насыщения  $107^\circ\text{C}$ . Далее в ТВС начинается объемное кипение, при котором истинное объемное паросодержание достигает величины 0,15. Пар уходит в верхнюю часть бака, где конденсируется при контакте с недогретой жидкостью. При этом проявляется второй механизм ЕЦ – местная вторичная естественная циркуляция в баке РУ: по горячим каналам идет подъемное течение, по холодным – опускное.

На рисунке 9 отсутствие момента пересечения кривых указывает на рост средней температуры в баке и частичную генерацию пара. Расхолаживание АЗ в данных условиях не происходит.

На рисунке 10 видно, что несмотря на высокую температуру теплоносителя в баке температура в первом контуре снижается до  $35^\circ\text{C}$  за счет вентиляции и отсутствия общекартурной циркуляции.

На рисунке 12 в момент 27 с происходит опрокидывание циркуляции – первая критическая точка, 4,3 ч – температура теплоносителя становится равной температуре насыщения.

Представленные результаты показывают, что данный сценарий не обеспечивает нормальные условия длительного пассивного расхолаживания аппарата без принятия дополнительных мер. Необходимо в течение 4 ч от сброса мощности запустить один ЦН1 от независимого источника или в кратчайшее время снизить расход ЦН2 до минимума, исключающего резкое снижение температуры в проточ-

ной части теплообменников со стороны первого контура, и таким методом восстановить естественную циркуляцию в первом контуре.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Представленные результаты подтверждают принципы пассивной теплогидравлической безопасности РУ ВВР-ц бассейнового типа при обесточивании ЦН, разработанные в 1960–1964 гг. при проектировании аппарата.

Анализ полномасштабного эксперимента на действующем аппарате с помощью расчетного теплогидравлического кода TRAC/PF1 [2] подтверждает высокую степень безопасности исследовательских реакторов бассейнового типа при авариях, связанных с обесточиванием ЦН.

Рекомендуется (реализовано на практике) использование для одного из пяти ЦН1 независимого источника питания при номинальном режиме эксплуатации – аккумуляторной подстанции. Расчетами показано, что при работе одного ЦН1 и полном обесточивании остальных ЦН1 и всех ЦН2 расхолаживание аппарата гарантируется без вскипания теплоносителя в первом контуре с номинальной мощностью до 18 МВт и работе системы вентиляции. Выводы подтверждаются экспериментом на действующем аппарате, проведенном в 1975 г. Важным аспектом при данном сценарии расхолаживания является отсутствие опрокидывания циркуляции в первом контуре при переходе на естественную циркуляцию. Максимальная температура теплоносителя в первом контуре при данном сценарии не превышает 70°C.

В материале представлен расчетный анализ двух проектных аварий в более жестких условиях:

- полное обесточивание всех ЦН первого и второго контуров при номинальной мощности РУ 18 МВт и работе системы вентиляции;
- полное обесточивание всех ЦН первого контура и работе ЦН второго контура в номинальном режиме при номинальной мощности РУ 18 МВт.

### **Результаты расчетов первой аварии**

1. В момент 27 с после сброса мощности происходит опрокидывание циркуляции в первом контуре в связи с переходом на естественную циркуляцию.
2. Момент опрокидывания является первой критической точкой – максимальная температура в АЗ достигает максимума 93°C.
3. В дальнейшем в первом контуре имеет место устойчивая естественная циркуляция с расходом 10 – 12 кг/с в течение 24 ч. Максимальная температура теплоносителя в зоне сначала снижается и далее медленно увеличивается.
4. В момент 15,3 часа от сброса мощности достигается второй максимум температуры теплоносителя в АЗ (76°C) вторая критическая точка. Данный момент соответствует уравниванию подводимой мощности остаточного тепловыделения и мощности, отводимой к окружающей среде за счет вентиляции.
5. В дальнейшем (15,3 – 24 ч) уровень температур в АЗ и первом контуре медленно монотонно снижается.

### **Результаты расчетов второй аварии**

1. В момент 27 с после сброса мощности происходит опрокидывание циркуляции в первом контуре в связи с переходом на естественную циркуляцию.
2. Момент опрокидывания является первой критической точкой – максимальная температура в АЗ достигает максимума 89°C.
3. В дальнейшем в первом контуре имеет место неустойчивая знакопеременная затухающая естественная циркуляция с расходом на уровне 0,1 кг/с. Максимальная температура теплоносителя в активной зоне сначала снижается и далее медленно увеличивается.

4. На фоне затухания общеконтурной циркуляции проявляется вторичная естественная циркуляция в баке РУ, по «горячим» ТВС развивается подъемное течение, а по «холодным» – опускное. Интенсивная вторичная циркуляция сдерживает уровень температуры при сохранении темпа разогрева теплоносителя в зоне.

5. В момент 4 ч от сброса мощности максимальная температура теплоносителя в горячем ТВС (в верхнем сечении) достигает максимума 107°C – температуры насыщения.

6. Далее температура теплоносителя в активной зоне поддерживается на уровне температуры насыщения 107°C, при этом происходит постоянная генерация пара. Подводимая мощность расходуется на прогрев жидкости в баке до температуры насыщения. В то же время температура в первом контуре (за пределами бака) снижается до 35°C за счет вентиляции.

Более напряженный режим расхолаживания во второй аварии, по сравнению с первой, связан с расположением теплообменников на нижней отметке первого контура (под АЗ).

Сравнение результатов двух аварий позволяет сделать следующую рекомендацию. В рассматриваемом втором режиме для обеспечения снижения уровня температуры необходимо либо оперативно перекрыть расход по второму контуру до минимума (привести в соответствие с подводимой мощностью) с целью восстановления естественной общеконтурной циркуляции либо обеспечить запуск одного ЦН1 от независимого источника в течение 4 ч.

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АЗ – активная зона; ВВР-ц – водо-водяной реактор; ЕЦ – естественная циркуляция; ИС РУ – исследовательская реакторная установка; ИС РБТ- исследовательский реактор бассейнового типа; НИИАР – научно исследовательский институт атомных реакторов в Дмитровграде; СУЗ – система управления, контроля и защиты реактора; ТВС – тепловыделяющая сборка; ЦН – циркуляционный насос; ЯЭУ – ядерная энергетическая установка; TRAC – Transient Reactor Analysis Code (LANL).

### Литература

1. Отчет «Исследование влияния аварийного отключения второго контура реактора ВВР-ц на температуру воды I контура». – Обнинск: Филиал НИФХИ им. Л.Я. Карпова, 1975.
2. Маркин С.А. и др. Посттестовый анализ режима естественной циркуляции при расхолаживании реактора бассейнового типа с привлечением кода RELAP5/MOD3.2/Доклад на отраслевой конф.: «Теплогидравлические коды для энергетических реакторов». – Обнинск, 2001.
3. Кириллов П.Л. Юрьев Ю.С. Гидравлические расчеты ИТП ФЭИ. – Обнинск, 2007.
4. TRAC – PFI/Mod2. Theory manual. Los Alamos National Laboratory, 1993.
5. Делайе Д. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
6. Кузнецов Ю.Н. Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

Поступила в редакцию 24.12.2009

# УДК 539.125.5.03:621.039.512

*Interval Estimation of Reactivity* \A.G. Yuferov, R.L. Ibragimov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 2 illustrations. – References, 13 titles.

The algorithms of an estimation of an interval of uncertainty for a reactivity meter are described on the basis of an integral equation of a kinetics.

# УДК 504.064

*Management of Remediation Measures on Radioactively Contaminated Territories with the use of Multiobjective Optimization* \S. Gritsyuk, B. Yatsalo, V. Didenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References, 35 titles.

Optimization of the countermeasure structure on remediation of radioactively contaminated territory is considered. Multiobjective optimization is based on implementation of modified genetic algorithms and treatment of uncertain/fuzzy criteria. Geographic information system (GIS) of contaminated territory is used within the case study analysis on countermeasure optimization. This study demonstrates effectiveness of integration of multiobjective methods, genetic algorithms and GIS within the problems on environmental protection and remediation of contaminated sites.

# УДК 504.45: 546.027

*Up-to-date Content of Long-Lived Artificial Radionuclides in the Area of the Tom and Ob Rivers Impacted by the Siberian Chemical Combine Discharges* \A.I. Nikitin, I.I. Kryshev, N.I. Bashkurov, N.K. Valetova, G.E. Dunaev, A.I. Kabanov, I.Yu. Katrich, A.O. Krutovsky, V.A. Nikitin, G.I. Petrenko, A.M. Polukhina, G.N. Selivanova, V.B. Chumichev, V.N. Shkuro; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 5 illustrations. – References, 9 titles.

Data are presented and discussed on content of  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  and other artificial radionuclides in water, bottom sediments and flood-plain soils of the Tom and Ob rivers part from Tomsk to the region of their confluence (through which the radioactive effluents of the Siberian Chemical Combine are transported). Data received in 2008-2009 in frames of the ISTC Project No.3547 «Analysis of radionuclide transport and assessment of radiation risk for population and environmental objects in the Ob-Irtysh river basin».

# УДК 621.039.51: 621.039.58

*Numerical-Experimental Analysis of Emergency Shut Down Cooling of VVRC Reactor at Loss of ELECTRICAL Supplying of the Circulating Pumps* \O.Yu. Kochnov, V.V. Sergeev, A.A. Kazantsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 13 pages, 8 tables, 12 illustrations. – References, 6 titles.

Based on the experiment performed on the pool type research reactor VVRC during operation at emergency condition of shut down cooling and the data obtained on reactor IS RY RBT-6, post-test calculations of dynamics at shut down cooling of facility are carried out at loss of power supply of circulating pumps. In the paper are presented the results of calculations at shut down cooling of reactor VVRC at natural circulation mode, starting from maximal acceptable power. Calculations were carried out with using the international thermal hydraulic code TRAC designed for the analysis of technical safety for water-cooled nuclear power plants.

# УДК 621.039.5

*Simulation of Transients in the Circuits of Nuclear Power Plants with BN-type Reactors Involving Variable-Speed Drives of Reactor Coolant Pumps* \E.Yu. Anishev, V.S. Gorbunov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 4 illustrations. – References, 4 titles.

Based on the simulation of thermal hydraulic transients, the paper analyzes the advantages of smooth variation of coolant flow in the primary circuits of nuclear power plants with fast neutron reactors.

Maintenance of optimal turbine steam parameters and “softer” transients help to increase power unit cost effectiveness and reduce thermal stresses and temperature gradients in reactor plant vessel structures.

# УДК 621.039.5

*Parameters of Fluctuations of the Working Body at Pulse Indignations on Pressure in the Second Contour of the Atomic Power Station with VVER-1000* \R.O. Katereev, K.N. Proskurjakov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 6 tables, 3 illustrations. – References, 5 titles.