

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В СИСТЕМЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК В РЕЖИМЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Г.А. Сорокин*, Х. Ниноката*, Х. Эндо**, А.Д. Ефанов***,
А.П. Сорокин***, Е.Ф. Иванов***, Г.П. Богословская***,
В.В. Иванов***, А.Д. Волков***, И.Р. Зуева***

** Токийский технологический институт, Токио*

*** Японская организация по безопасности ядерных реакторов*

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



Представлено описание экспериментальной установки и полученных экспериментальных данных по гидродинамике и теплообмену при кипении эвтектического натрий-калиевого сплава в системе двух параллельных тепловыделяющих сборок ТВС в контуре с естественной циркуляцией. Также приведено краткое описание модифицированных расчетной модели и кода для численного моделирования теплогидравлики при кипении жидкого металла как в одиночной ТВС, так и в системе параллельных ТВС в режиме естественной конвекции. Показано удовлетворительное согласие результатов расчетов по коду с экспериментальными данными. Моделирование теплогидравлики активной зоны в режиме с естественной конвекцией натрия позволяет определить условия устойчивого теплообмена при кипении и предотвратить кризис теплообмена, осушение тепловыделяющих элементов и плавление активной зоны в режиме аварийного расхолаживания быстрых реакторов.

ВВЕДЕНИЕ

Решение проблемы обеспечения безопасности быстрых реакторов в значительной степени связано с обеспечением возможности охлаждения активной зоны при возникновении в ней кипения жидкого металла.

Анализ безопасности реакторов на быстрых нейтронах для запроектной аварии, связанной с отключением циркуляционных насосов при срабатывании аварийной защиты, привел к решению задачи охлаждения тепловыделяющих сборок активной зоны (ТВС), включая режимы с кипением натрия. В этих режимах происходит разогрев активной зоны при весьма малых скоростях общеконтурной циркуляции теплоносителя [1–3].

© Г.А. Сорокин, Х. Ниноката, Х. Эндо, А.Д. Ефанов, А.П. Сорокин, Е.Ф. Иванов,
Г.П. Богословская, В.В. Иванов, А.Д. Волков, И.Р. Зуева, 2005

Исследования кипения жидкого металла в ТВС в контурах с естественной циркуляцией показали, что при определенных условиях происходит нарушение стационарного режима и возникновение колебаний теплогидравлических параметров в циркуляционном контуре [4–7]. Проведенные в ГНЦ РФ-ФЭИ систематические исследования [6, 7] позволили получить не только качественную картину, но и дать количественное описание процесса развития двухфазного потока жидкого металла в одиночной ТВС в контуре с естественной циркуляцией теплоносителя: устойчивого пузырькового режима, затем неустойчивого снарядного, переходящего в устойчивый дисперсно-кольцевой и кризис теплообмена с осушением поверхности теплообмена (кризис 2-го рода).

В действительности активная зона быстрых реакторов является системой параллельных, гидравлически связанных каналов. Результаты выполненных применительно к водоохлаждаемым реакторам исследований [8–20] указывают на существенно более сложные процессы гидродинамики и теплообмена при кипении теплоносителя в системе параллельных каналов по сравнению с одиночными каналами. Вместе с тем, процессы теплообмена и устойчивость циркуляции при кипении жидкого металла в системе параллельных ТВС активной зоны быстрых реакторов совершенно не исследованы.

Следует отметить, что подавляющая часть экспериментальных и теоретических исследований теплообмена и устойчивости потока теплоносителя в системе параллельных парогенерирующих каналов была выполнена для условий вынужденной конвекции воды. Это, например, работы [8–16]. Существуют лишь ограниченные данные при кипении воды в системе каналов для режимов со смешанной и естественной конвекцией, опубликованные, например, в работах [17–22]. Тем не менее, результаты, представленные, например, в работе [17], указывают, что при переходе в аварийном режиме работы установки с принудительной на естественную циркуляцию воды по мере уменьшения общего расхода теплоносителя в циркуляционном контуре и приближения его к нулевому значению происходит перераспределение расхода теплоносителя между параллельными каналами.

Особенностью процессов гидродинамики и теплообмена при кипении теплоносителя в системе параллельных обогреваемых каналов при малых скоростях циркуляции теплоносителя в отличие от кипения теплоносителя при больших скоростях циркуляции, характерных для развитой вынужденной конвекции, является усиление гидродинамического взаимодействия каналов, что может привести к развитию в системе каналов межканальной циркуляции и аperiодической неустойчивости потока и к прекращению или к опрокидыванию циркуляции в наиболее теплонпряженном канале и к кризису теплообмена в нем.

Следует отметить одну важную особенность быстрых реакторов, оказывающую существенное влияние на условия теплообмена – низкое давление в теплоносителе и, вследствие этого, большое различие в плотности паровой и жидкой фаз, составляющее около трех порядков.

Таким образом, задача определения условий устойчивой циркуляции и теплообмена при кипении жидкого металла в системе параллельных ТВС активной зоны быстрых реакторов в режимах естественной циркуляции с малыми скоростями жидкого металла весьма актуальна.

Для анализа безопасности при аварийном расхолаживании быстрых реакторов с натриевым охлаждением необходимо дальнейшее развитие теоретических моделей и расчетных кодов, разработанных для оценки области устойчивого охлаждения водоохлаждаемых установок [10, 19, 21, 22], или создание новых кодов применительно к режимам с малыми скоростями при естественной циркуляции теплоносителя и их тестирование на экспериментальном материале.

Целью настоящей работы является изучение физики и характеристик процессов гидродинамики и теплообмена при кипении жидкого металла в системе параллельных ТВС в контуре с естественной циркуляцией теплоносителя, а также возможностей их прямого численного моделирования.

КОНСТРУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МОДЕЛЕЙ ТВС

Для проведения экспериментальных исследований кипения жидкого металла в системе параллельных ТВС в ГНЦ РФ-ФЭИ создана экспериментальная установка, состоящая из двух контуров естественной циркуляции, в каждом из которых установлены модельные сборки с электрообогреваемыми элементами, при общем опускном участке контура, в котором размещен холодильник (рис. 1а). Емкости над сборками также соединены. Каждая изборок может работать автономно, будучи включена в свой циркуляционный контур. Установка смонтирована на натрий-калиевом контуре стенда АР-1 [23].

Геометрия модели ТВС моделирует типичные условия ТВС реакторов на быстрых нейтронах (БН-600, БН-800). Диаметр 7 тепловыделяющих элементов составляет 8 мм, относительный шаг решетки – 1.19, длина зоны энерговыделения – 830 мм. Тепловыделяющие элементы расположены в корзине из 12 необогреваемых элементов, чтобы обеспечить конфигурацию геометрии бесконечной решетки (рис.1б).

Перед зоной энерговыделения имеется участок гидродинамической стабилизации длиной 130 мм. Над зоной энерговыделения расположен необогреваемый участок тягового плеча высотой 800 мм. Выход теплоносителя в пространство над сборкой осуществляется через уменьшенную в размерах головку захвата ТВС. Другие высоты контуров также соответствуют геометрии реактора БН-600 – расположение по высоте холодильника относительно участка энерговыделения, высоты предвключенного перед зоной нагрева участка и кассеты до головки захвата ТВС.

Установка позволяет проводить исследования при различных значениях статического давления в зоне кипения. Изменение давления осуществляется путем откачки аргона из газовых полостей баков, расположенных над моделями ТВС. Откачка осуществляется через ловушки паров, установленных на газовакуумных линиях. Для уменьшения колебаний давления в газовых полостях баков они соединены с газовой полостью дыхательного бака стенда, объем которого составляет 100 л. Это позволяет удерживать стабильное значение давления в зоне кипения.

Отвод тепла из циркуляционных контуров осуществляется с помощью холодильников двух типов. Один холодильник типа «трубки Фильда» установлен на опускной линии контуров. Второй холодильник в виде «рубашек» расположен на баках в вер-

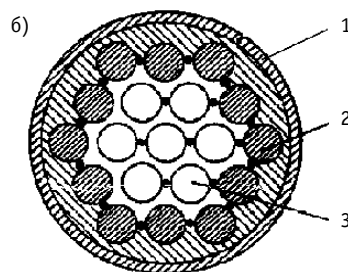
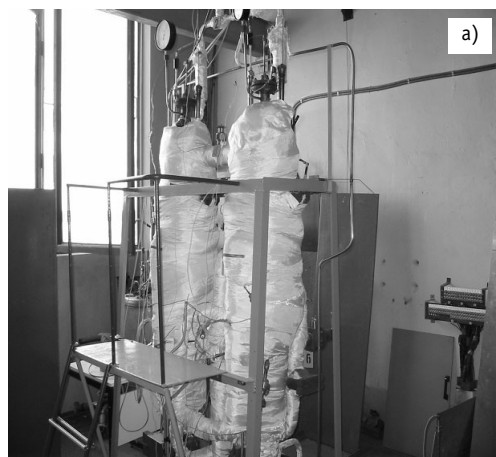


Рис. 1. Фрагмент установки для экспериментального исследования кипения жидкого металла в системе параллельных тепловыделяющихборок (а) и поперечное сечение тепловыделяющейборок (б): 1 – корпусборок, 2 – необогреваемые стержни, 3 – тепловыделяющие элементы

хней части контура циркуляции. «Рубашки» снабжены линзовыми компенсаторами для компенсации неравномерности температурных расширений.

Перед ТВС в правом и в левом контурах циркуляции установлены дроссельные устройства в виде подвижных реек с дроссельными шайбами трех размеров (12, 16 и 20 мм), с помощью которых в процессе работы установки можно осуществлять различное дросселирование потока в контурах.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальные исследования теплообмена и устойчивости циркуляции теплоносителя при кипении эвтектического натрий-калиевого сплава в моделях ТВС проводились первоначально отдельно для левого и правого контуров циркуляции, а затем при их параллельной работе в режимах с естественной конвекцией теплоносителя. Условия проведения и отдельные характеристики проведенных экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условия и параметры экспериментов по исследованию кипения жидкого металла в системе параллельных модельных сборок при естественной конвекции теплоносителя

Параметры экспериментов	Условия экспериментов			
	Независимая работа сборок		Параллельная работа сборок с одинаковой мощностью энерговыделения	
Экспериментальные ТВС	Левая обогреваемая ТВС	Правая обогреваемая ТВС	Левый контур	Правый контур
Время обогрева, с	4000	5200	5200	
Время от начала обогрева, с	3450	5200	5100	5100
Начальный тепловой поток, кВт/м ² *	0,0	30,0	8,0	8,0
Давление на выходе из пучка, бар	0.4	0.4	0.4	0.4
Максимальный тепловой поток на поверхности тепловыделяющего элемента, кВт/м ²	104,0	130,0	130,0	133,0
Начальный расход теплоносителя в циркуляционной петле, м ³ /ч	0.15	0.25	0.10	0.20
Максимальный расход теплоносителя в циркуляционной петле, м ³ /ч	0.82	0.63	1.00	0.90
Максимальная температура теплоносителя, °С	744	737	761	758

*отнесенный ко всей поверхности тепловыделения

Эксперименты были выполнены при постепенном увеличении мощности энерговыделения в моделях ТВС. Плотность теплового потока тепловыделяющих элементов увеличивалась с шагом 10–20 кВт/м². Далее определенное время выдерживалось для стабилизации теплогидравлических параметров.

Исследования проводились при пониженном давлении. Давление в дыхательных емкостях составляло около 0,4 бар, что соответствовало давлению в верхней области энерговыделения в моделях ТВС в диапазоне 0,49–0,52 бар.

Система измерений в процессе экспериментов контролировала следующие параметры (рис. 2):

- электрическую мощность, подводимую к тепловыделяющим элементам и электронагревателям установки;

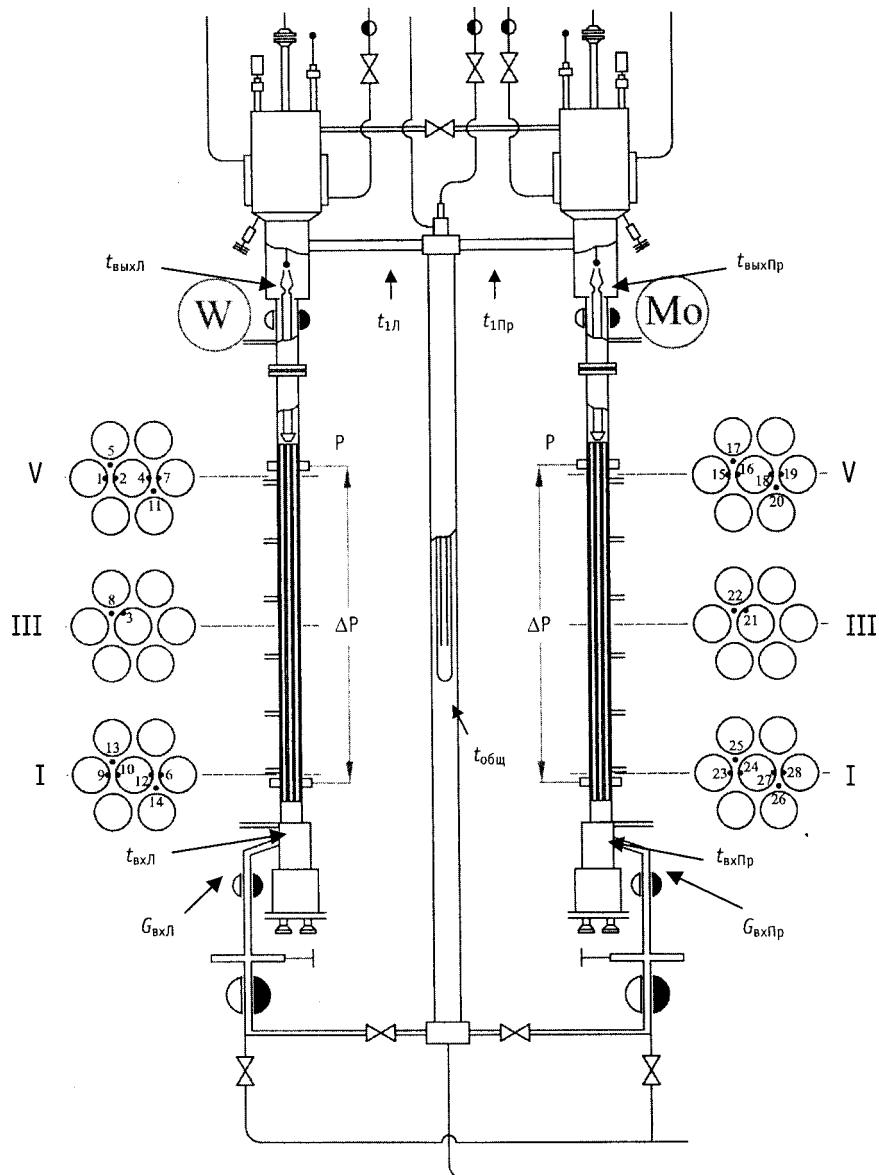


Рис. 2. Схематическое изображение фрагмента экспериментальной установки для исследования кипения жидкого металла в системе параллельных ТВС и расположение датчиков температуры, давления, расхода теплоносителя и температуры оболочки тепловыделяющих элементов (Л – левая сборка, П – правая сборка, индексы вх, вых, общ указывают входную, выходную и общую для контуров температуру соответственно)

- расход теплоносителя;
- статическое давление и пульсации давления в зоне кипения;
- перепад давления в моделях ТВС на участках тепловыделения;
- температуру поверхности тепловыделяющих элементов в 3-х сечениях по высоте участка энерговыделения;
- температуру теплоносителя в 3-х сечениях по высоте участка энерговыделения и в различных точках контура циркуляции;
- расход охлаждающей воды.

Для измерения расходов теплоносителя в каждом из контуров перед входом в зону энерговыделения был установлен магнитный расходомер.

Статическое давление в зоне кипения контролировалось с помощью образцового манометра. Перепад давлений на рабочих участках измерялся модернизированными преобразователями типа «Сапфир-22ДД». Измерение переменной составляющей (пульсаций) давления теплоносителя в зоне кипения выполнялось с помощью датчика «ПУЛЬС».

Измерение температуры наружной поверхности оболочки электрообогреваемых элементов и температуры теплоносителя осуществлялось хромель-алюмелевыми термомпарами в чехлах из нержавеющей стали диаметром 0,5–0,8 мм.

Сбор и регистрация экспериментальных данных производилась в оцифрованном виде с помощью автоматизированной системы управления теплогидравлическими исследованиями. Система построена на базе ЭВМ и обеспечивается системой аппаратных и программных средств для сбора и обработки экспериментальных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одиночные петли. На рис. 3 приведены типичные диаграммы изменения параметров при кипении жидкого теплоносителя в правом контуре. Теплогидравлические характеристики левого контура оказались практически идентичны соответствующим характеристикам правого контура.

По мере увеличения подводимой мощности происходил разогрев теплоносителя, возрастал расход теплоносителя в контурах циркуляции. При плотности теплового потока тепловыделяющих элементов ~ 95 кВт/м² в сечении на выходе из участка энерговыделителя появились пульсации температуры теплоносителя, стенки тепловыделяющих элементов, расхода и давления теплоносителя, характеризующие вскипание теплоносителя. При тепловом потоке ~ 130 кВт/м² возникли устойчивые пульсации теплогидравлических параметров. Первоначально наблюдались пульсации с небольшой амплитудой и периодом 3–5 с, характеризующие образование, рост и унос паровых пузырьков потоком теплоносителя. Затем проявился колебательный процесс с большей амплитудой и периодом пульсаций в диапазоне от 20 до 40 с. При этом пульсации всех параметров оказались синхронизированы во времени. Их амплитуда и период постепенно увеличивались с течением времени.

Колебания параметров с большой амплитудой характеризуют образование снарядоподобных пузырей, которые расширяются по сечению сборки, а также вниз и вверх по потоку теплоносителя, что приводит к резкому падению расхода, увеличению давления на входе в сборку, росту падения давления по тракту участка энерговыделения и к значительному увеличению измеряемой термопарой температуры теплоносителя. После уноса снаряда потоком жидкого металла расход и давление в подъемном участке возвращается к своим исходным значениям. Расход резко увеличивает-ся, участок энерговыделения заполняется холодным теплоносителем и процесс разогрева повторяется. С течением времени период времени существования снаряда возрастает.

Система параллельных ТВС с идентичными параметрами. В ходе эксперимента температура теплоносителя достигла температуры насыщения несколько быстрее в левой ТВС, чем в правой. При тепловом потоке тепловыделяющих элементов ~ 95 кВт/м² в левой ТВС началось подкипание теплоносителя. При этом расход теплоносителя в левом контуре резко снизился. Через небольшой промежуток времени (~ 30 с) произошел скачок расхода теплоносителя в обоих контурах до значения $\sim 0,45$ м³/ч. В дальнейшем, при увеличении теплового потока до 130 кВт/м² изменение значений теплогидравлических параметров в левом и в правом контурах происходило синхронно (рис. 4–6).

В промежутке времени от 3500 до 4200 с наблюдались колебания теплогидрав-

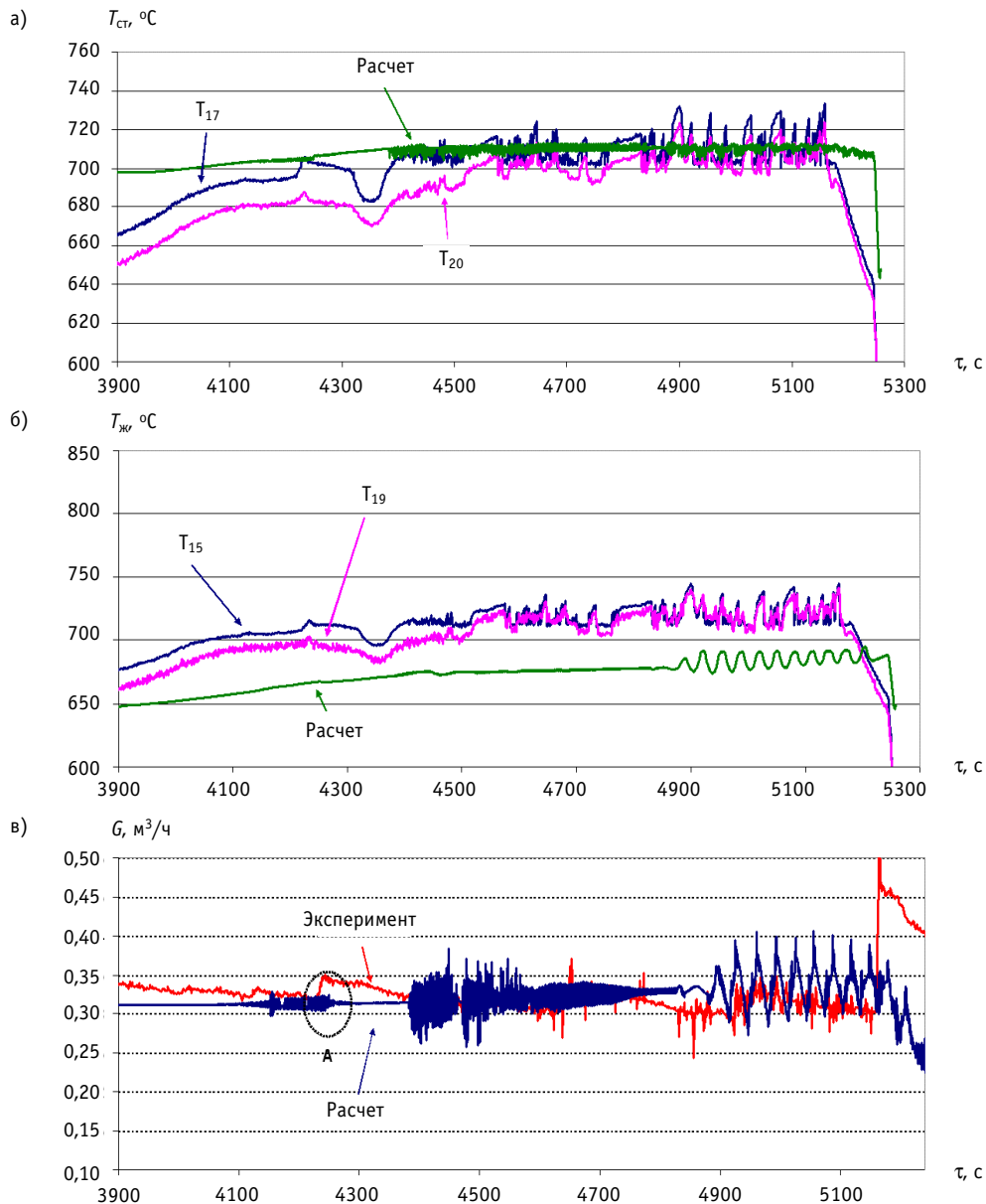
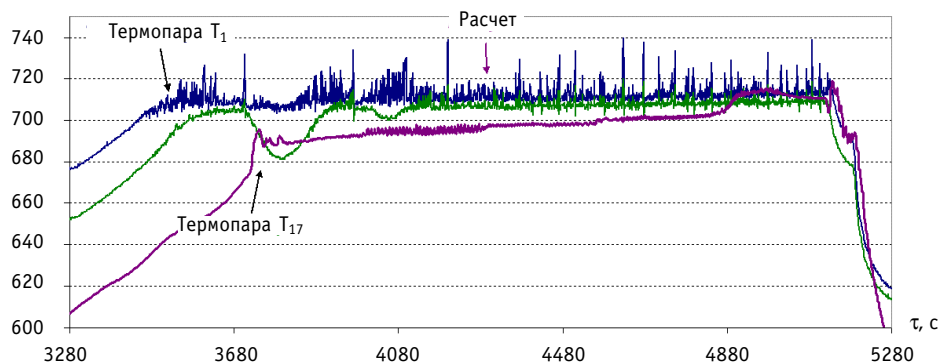


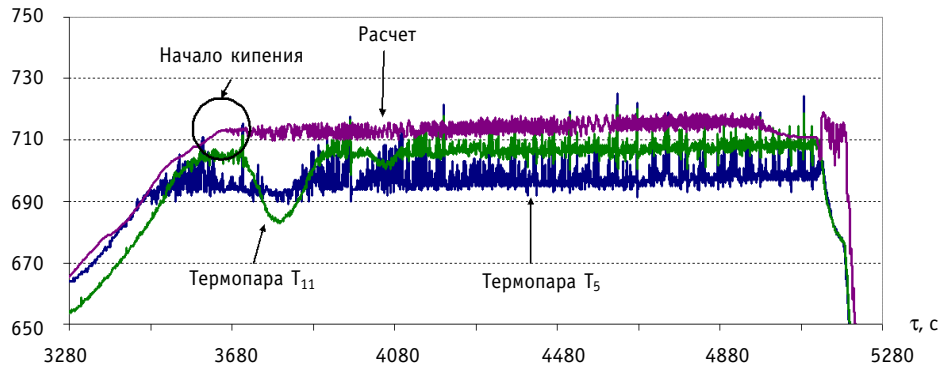
Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных распределений во времени температуры поверхности тепловыделяющих элементов (а), температуры теплоносителя (б) и расхода теплоносителя (в) при работе отдельной тепловыделяющей сборки

лических параметров с малой амплитудой и с периодом около 3 с (автоколебания). Затем наступил противофазный режим колебаний с большой амплитудой и с периодом 20–35 с с наложением режима автоколебаний (рис. 6 а–в). Амплитуда пульсаций расхода в системе параллельных взаимодействующих ТВС возросла до $\sim 0,50 \text{ м}^3/\text{ч}$ по сравнению с амплитудой пульсаций расхода в ТВС в одиночном циркуляционном контуре $\sim 0,05 \text{ м}^3/\text{ч}$, что указывает на эффект усиления пульсаций вследствие гидравлического взаимодействия параллельных каналов – эффект межканальной неустойчивости. При этом наблюдается падение расходов теплоносителя в левом и в правом контурах до 3–5 раз.

а) $T_{стл}, ^\circ\text{C}$



б) $T_{жл}, ^\circ\text{C}$



в) $G, \text{м}^3/\text{ч}$

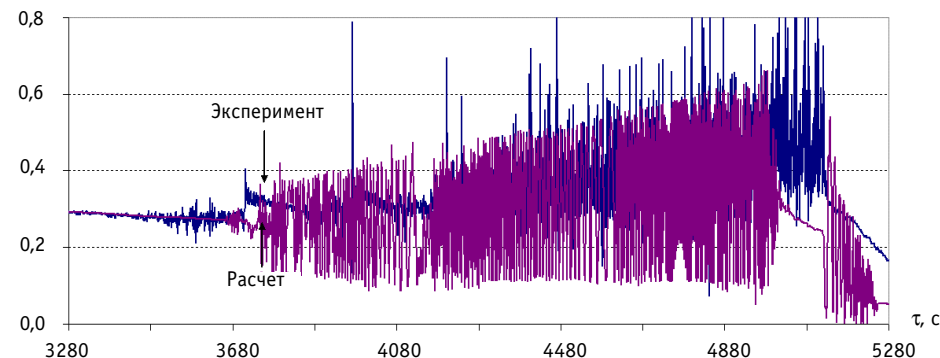


Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных распределений во времени температуры поверхности тепловыделяющих элементов (а), температуры теплоносителя (б), расхода теплоносителя (в) в левой ТВС при параллельной работе ТВС с одинаковым энерговыделением

Следует отметить, что обработка экспериментальных данных путем вычитания постоянной составляющей расхода для левого и правого контуров указала также на наличие противофазного колебания расхода теплоносителя в различных контурах с периодом 150–200 с (рис. 6г).

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для осуществления численного моделирования гидродинамики и теплообмена при кипении жидкого металла в системе параллельных ТВС развита новая версия кода SABENA [24], разработанного ранее для теплогидравлического анализа кипения на-

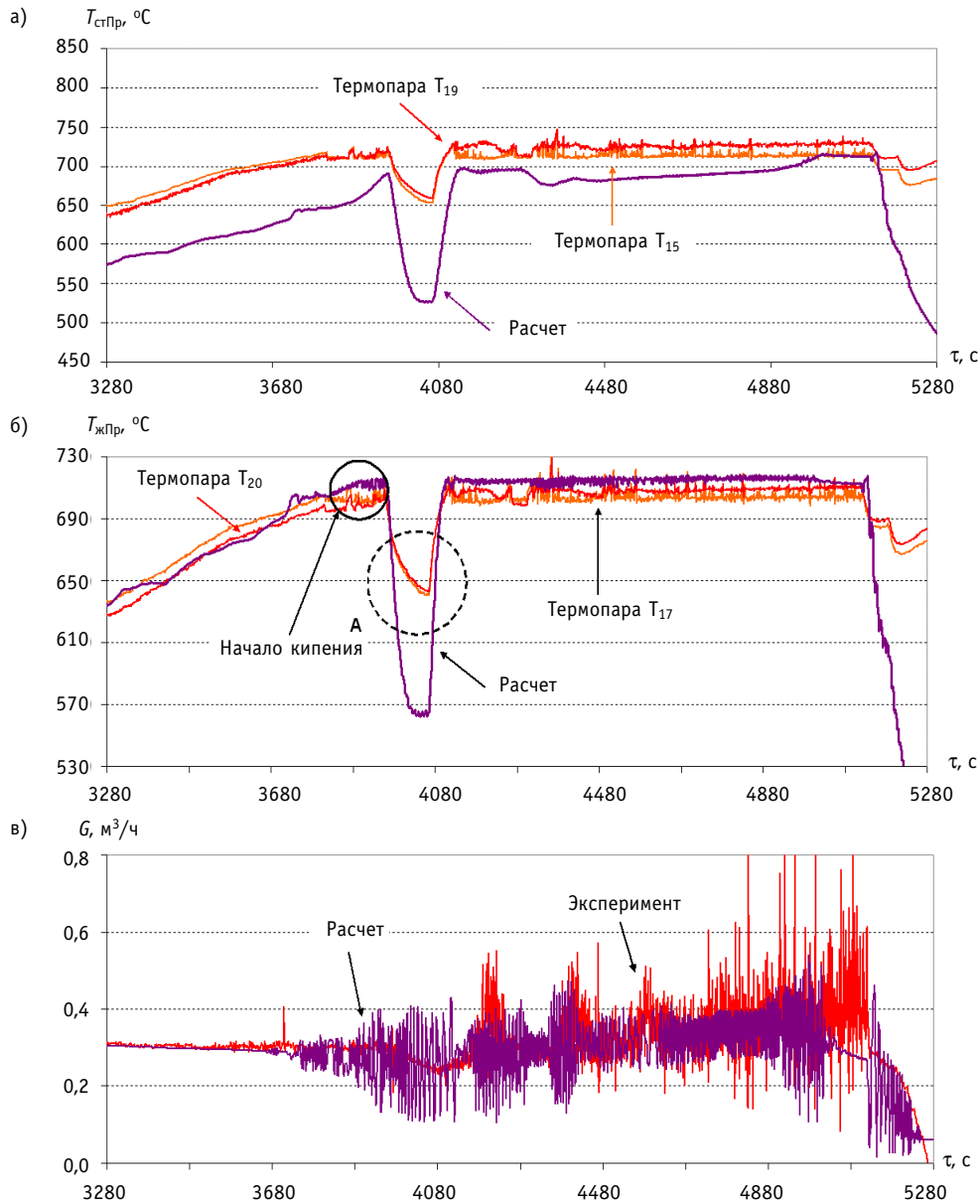


Рис.5. Сравнение расчетных и экспериментальных распределений во времени температуры поверхности тепловыделяющих элементов (а), температуры теплоносителя (б), расхода теплоносителя (в) в правой ТВС при параллельной работе ТВС с одинаковым энерговыделением

трия в ТВС быстрых реакторов, реализующая двухжидкостную модель двухфазного потока жидкого металла в приближении равных давлений в паровой и жидкой фазах [25].

Сборка тепловыделяющих элементов моделируется в многомерном поканальном приближении, остальная часть контура циркуляции в одномерном приближении. Замыкающие соотношения и теплофизические свойства эвтектического натрий-калиевого сплава уточнены путем проведения специального анализа с использованием экспериментальных данных [26–29]. Реализованная в коде численная процедура решения системы уравнений сохранения массы, импульса и энергии двухфазного потока по методу конечных разностей позволила выполнить численное моделирова-

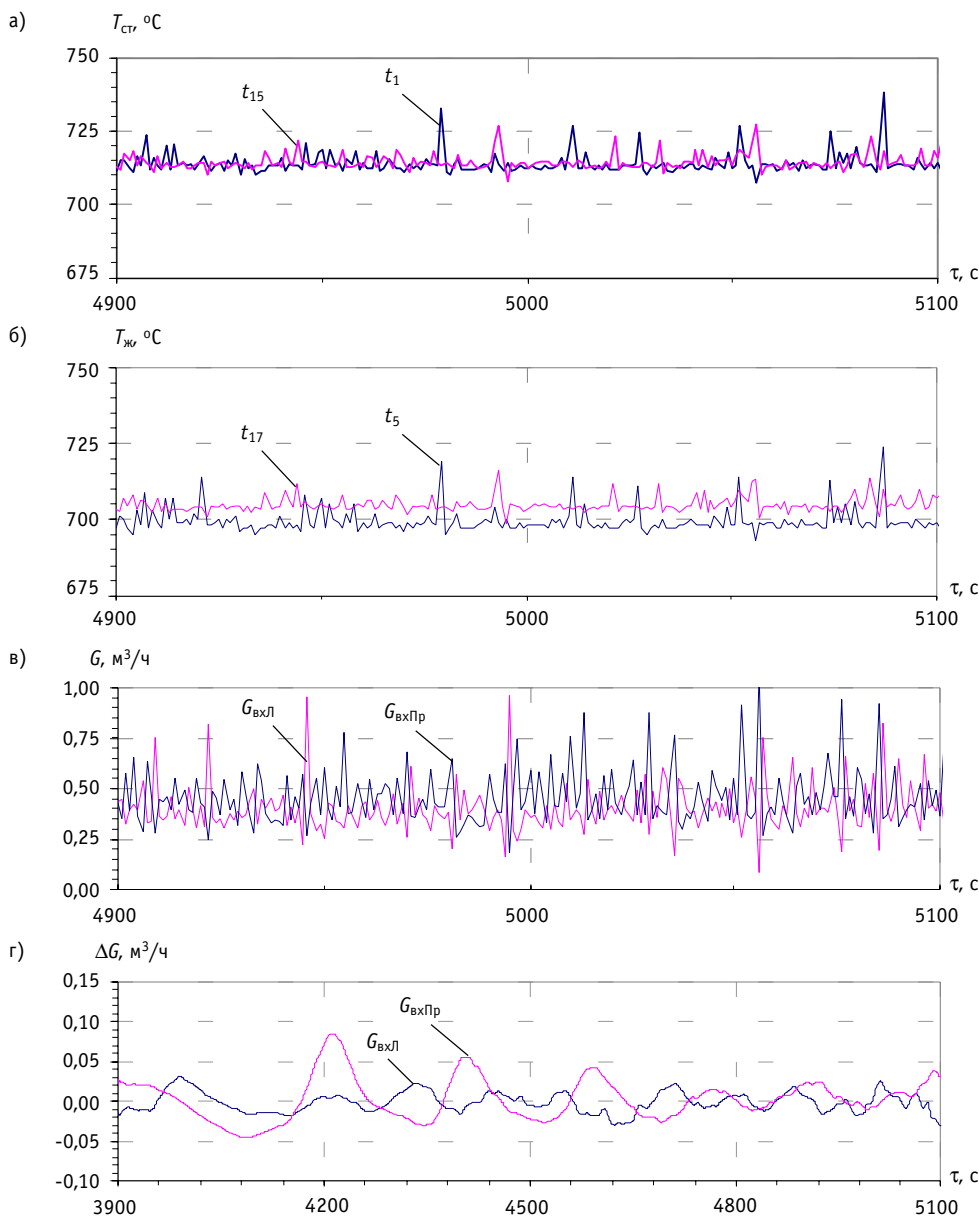


Рис.6. Фрагмент изменения во времени температуры поверхности тепловыделяющих элементов (а), температуры теплоносителя (б) и расхода теплоносителя (в) в правой и в левой ТВС, результаты обработки данных по расходу теплоносителя в правой и в левой ТВС (г) при параллельной работе сборок с равным энерговыделением

ние теплогидравлики в циркуляционном контуре как для случая одиночной ТВС, так и системы параллельных ТВС [30].

Результаты численного моделирования гидродинамики и теплообмена для условий эксперимента для одиночной энерговыделяющей ТВС в контуре циркуляции показывают (рис. 3), что при расчете возникновение пузырькового кипения теплоносителя обнаруживается несколько позднее, чем в эксперименте. В дальнейшем, хотя результаты расчетов не описывают полученные в эксперименте пульсации параметров высокого порядка, тем не менее расчеты удовлетворительно описывают изменение во времени средних значений температуры теплоносителя и оболочки имитато-

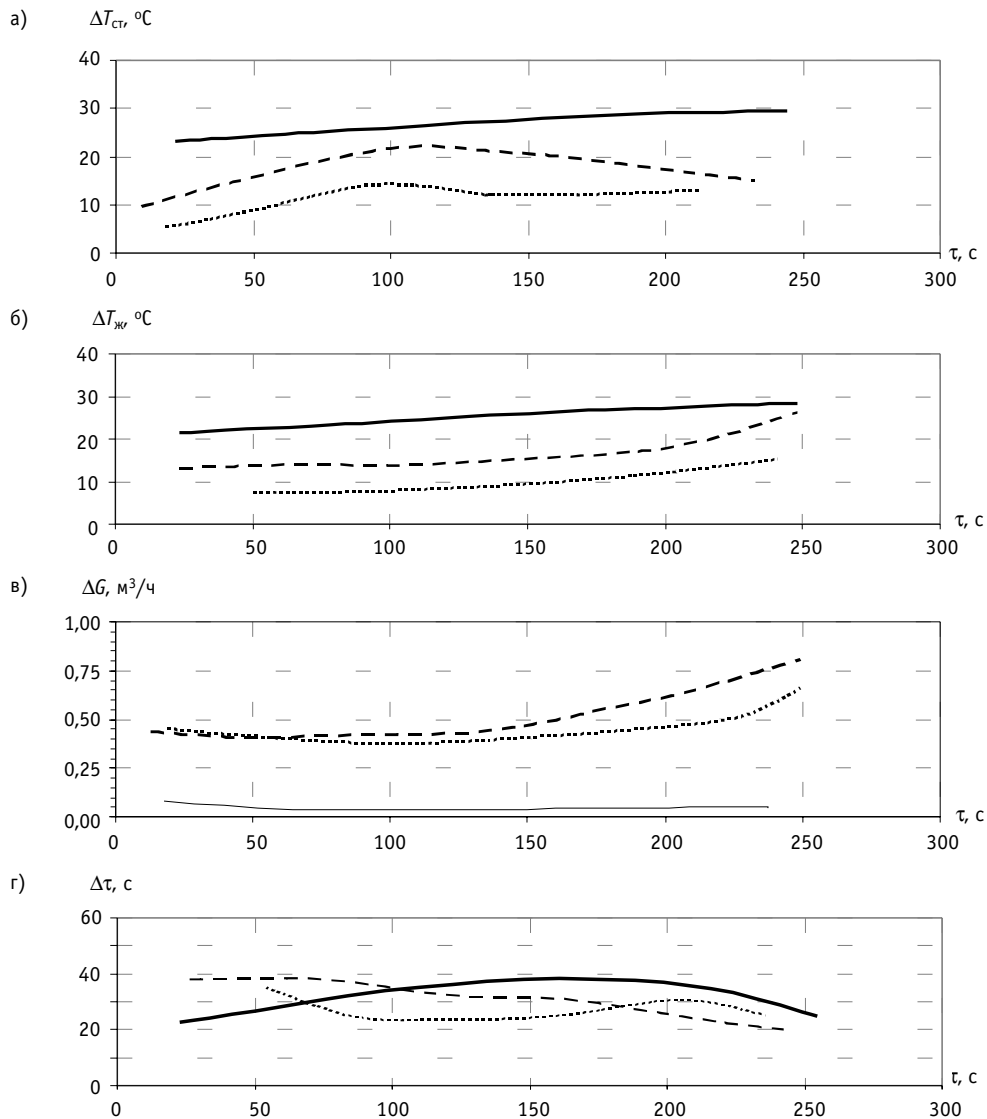


Рис.7. Амплитуды колебаний температуры стенки (а), температуры теплоносителя (б), расхода теплоносителя (в) и период их колебаний (г): одиночная правая ТВС (—); параллельные левая (---) и правая (···) ТВС при одинаковом энерговыделении

ров твэлов, а также изменение расхода теплоносителя в течение всего переходного процесса до момента отключения мощности.

Для системы параллельных ТВС, как видно из рис. 4 и 5, расчеты воспроизводят ход температуры, развитие режимов течения однофазного потока (пузырькового, снарядного), пульсации расхода жидкого металла. Расчеты демонстрируют противофазные пульсации расхода теплоносителя в параллельных ТВС, межканальную неустойчивость, характеризующуюся значительным возрастанием амплитуды пульсаций расхода теплоносителя в параллельных ТВС по сравнению с одиночными ТВС, периодическим падением расхода теплоносителя в ТВС практически до нуля и возможным осушением ТВС.

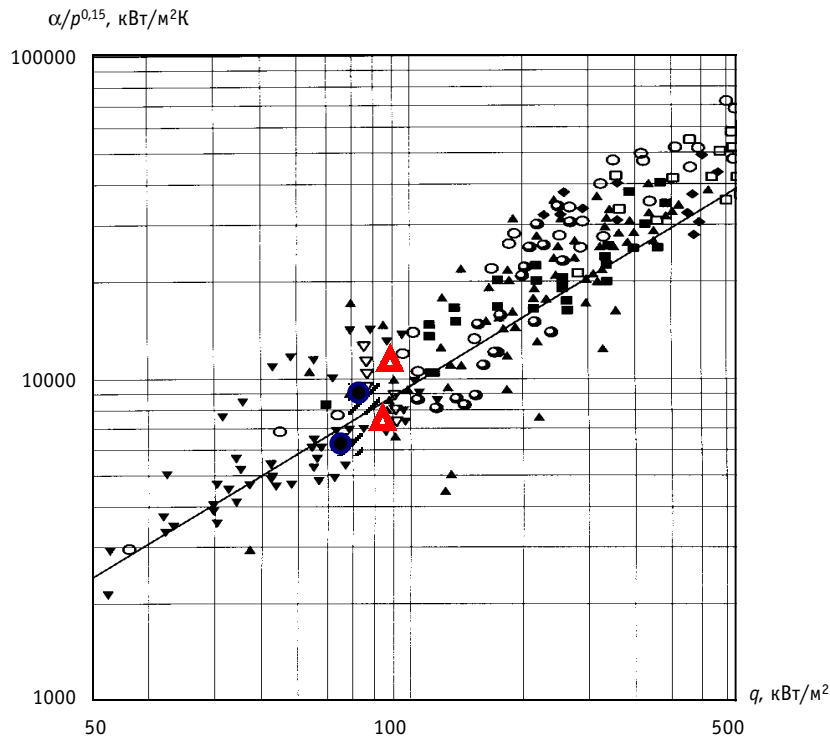


Рис. 8. Сравнение данных по теплоотдаче при кипении жидких металлов: — расчет по формуле (1) [32]. Экспериментальные данные:

Калий [31]: ▼ — большой объем; ○ — труба $D = 10$ мм (теплообменник); ▲ — труба $D = 6$ мм (электрический обогрев); ■ — труба $D = 10$ мм (электрический обогрев); ▽ — труба $D = 22$ мм (электрический обогрев); ◆ — труба $D = 8,3$ мм (электрический обогрев); □ — труба $D = 4$ мм (электрический обогрев)

Na-K эвтектический сплав (ГНЦ РФ-ФЗИ): ● — отдельная 7-элементная сборка с длиной тепловыделения 420 мм [6,7]; ■ — 7-элементные сборки с длиной тепловыделения 830 мм: — отдельная (правая) сборка, ▲ — параллельные сборки с одинаковой мощностью

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Расходная характеристика. С увеличением мощности энерговыделения в ТВС расход теплоносителя в контурах циркуляции постепенно возрастает. При возникновении кипения теплоносителя (плотность теплового потока тепловыделяющих элементов более 100 кВт/м^2) темп роста расхода увеличивается. Зависимости расхода при индивидуальной и параллельной работе контуров оказались близкими.

Межканальная неустойчивость. При закипании жидкого металла в одной из ТВС возникшие в соответствующем контуре циркуляции пульсации расхода теплоносителя и других теплогидравлических параметров обуславливают противофазные синхронизированные пульсации параметров в другом контуре циркуляции. Для снарядного режима период пульсаций теплогидравлических параметров находится в диапазоне от 20 до 40 с. Размах пульсаций расхода теплоносителя в системе параллельных каналов (ТВС) при этом практически на порядок превышает размах пульсаций расхода при индивидуальной работе каналов (рис. 7). Увеличение расхода теплоносителя при уносе парового «снаряда» в одном из контуров может привести к «запиранию» (снижению расхода до нуля) в другом контуре циркуляции и к осушению поверхности твэлов или к инверсии расхода теплоносителя в этом контуре. Эффект «резонанса» пульсаций усиливается при различии энерговыделения в параллельных ТВС.

Теплоотдача от тепловыделяющих элементов. Величина температурного напора стенка-жидкость для пузырькового и снарядного режимов кипения для диапазо-

на тепловых потоках от 90 до 250 кВт/м² находится в пределах от 10 до 20°C. Выполненный анализ показывает, что полученные экспериментально значения коэффициентов теплоотдачи при кипении эвтектического натрий-калиевого сплава в пучках находятся в том же диапазоне, что и данные по теплоотдаче при кипении калия при течении в трубах [31] и при кипении жидких металлов в большом объеме [32], которые описываются зависимостью (рис. 8):

$$\alpha = Aq^m p^n,$$

где p – давление, q – плотность теплового потока; коэффициенты, описывающие различные данные, принимают значения $m = 0,7$; $n \approx 0,1 \dots 0,15$; $A = 4,5 \dots 7,5$ как для калия, так и для сплава натрий-калий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований кипения эвтектического натрий-калиевого сплава в системе двух параллельных модельных ТВС реактора на быстрых нейтронах в контуре с естественной циркуляцией теплоносителя показывают:

- при плотности теплового потока тепловыделяющих элементов ~ 95 кВт/м² в ТВС возникает пузырьковое кипение теплоносителя, которое характеризуется устойчивыми значениями с небольшими по амплитуде и с периодом от 1 до 5 с пульсациями теплогидравлических параметров (расход, давление, температура теплоносителя и поверхности тепловыделяющих элементов);
- при плотности теплового потока тепловыделяющих элементов ~ 130 кВт/м² пузырьковый режим кипения переходит в развитый снарядный режим кипения, характеризующийся колебаниями расхода с большой амплитудой, а также колебаниями других теплогидравлических параметров с периодом от 20 до 40 с, на который накладываются колебания теплогидравлических параметров с периодом около от 150 до 200 с, а также колебания теплогидравлических параметров с малой амплитудой и с периодом 3–5 с;
- зависимости расхода теплоносителя от плотности теплового потока тепловыделяющих элементов в отдельных ТВС, а также работающих в системе параллельных каналов, близки к соответствующим зависимостям расхода для контуров, работающих индивидуально;
- пульсации всех теплогидравлических параметров в отдельных контурах циркуляции происходят в одном временном режиме;
- возникновение колебательного процесса при кипении теплоносителя в одной из параллельных ТВС приводит к противофазному колебательному процессу в другой ТВС, в дальнейшем колебания теплогидравлических параметров в различных контурах носят противофазный характер;
- гидродинамическое взаимодействие контуров с течением времени приводит к значительному увеличению амплитуды колебаний расхода теплоносителя в них («резонанс» пульсаций расхода) и к возможному «запиранию» или инверсии расхода теплоносителя в контурах, к росту температуры теплоносителя и оболочки тепловыделяющих элементов (эффект межканальной неустойчивости) и в конечном итоге к возникновению кризиса теплообмена;
- значения коэффициентов теплоотдачи тепловыделяющих элементов при кипении жидкого металла в моделях ТВС в одиночных контурах и при их параллельной работе согласуются между собой и находятся примерно в том же диапазоне, что и данные по теплоотдаче при кипении жидких металлов в трубах и при кипении жидких металлов в большом объеме.

Модифицированный расчетный код SABENA-3D позволил осуществить численное моделирование процессов теплообмена и устойчивости циркуляции теплоносителя

при кипении жидкого металла как в одиночных ТВС, так и в системе параллельных ТВС в контуре с естественной конвекцией.

Литература

1. Усынин Г.Б., Кусманцев Е.В. Реакторы на быстрых нейтронах. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – С. 187.
2. Singer R., Betten P., Gillette J. et. al. Studies of Thermal-Hydraulic Phenomena in EBR-II//Nuclear Engineering and Design. – 1980. – V. 62. – P. 219-232.
3. Sakai K., Yano M., Tezuka H. Reactor Core Thermohydraulic Transients with Thermohydraulic Coupling//Nuclear Engineering and Design. – 1982. – V. 73. – № 3. – P. 373-404.
4. Kaizer A., Huber F. Sodium Boiling Experiment a Low Power under Natural Convection//Nuclear Engineering and Design. – 1987. – V. 100. – № 3. – P. 367-376.
5. Yamaguchi K. Flow Pattern and Dryout under Sodium Boiling Convection//Nuclear Engineering and Design. – 1987. – V. 99. – № 3. – P. 247-263.
6. Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Мальков В.Л., Колесник В.П., Марцинюк Д.Е., Рымкевич К.С., Корхов О.А. Экспериментальные исследования теплообмена и устойчивости кипения жидкометаллического теплоносителя в контуре естественной циркуляции/Препринт ФЭИ-2631. – Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ-ФЭИ, 1997.
7. Ефанов А.Д., Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Богословская Г.П., Колесник В.П., Марцинюк С.С., Мальков В.Л., Сорокин Г.А., Рымкевич К.С. Исследования теплообмена и устойчивости кипения жидкометаллического теплоносителя в контуре естественной циркуляции//Теплоэнергетика. – 2003. – № 3. – С. 20-26.
8. Aritomi M., Aoki S., Inoue A. Instabilities in Parallel Channel of Forced-convection Boiling Upflow System, (III) System with Different Flow Conditions between Two Channels//Nuclear Science and Technology. – 1979. – V. 16. – № 5. – P. 343-355.
9. Смолин В.И., Шпанский С.В., Есиков В.И. и др. Анализ теплогидравлической неустойчивости в каналах кипящего реактора//Атомная энергия. – 1980. – Т. 48. – Вып. 6. – С. 366-369.
10. Митенков Ф.М., Моторов Б.И. Механизмы неустойчивости процессов в тепловой и ядерной энергетике. – М.: Атомиздат, 1981.
11. Murase M., Nation M. BWR Lose of Coolant Integral Test with Two Bundle Loop I (Thermal-Hydraulic Characteristics in Parallel Channels)//Journal of Nuclear Science and Technology. – 1985. – V. 22. – № 3. – P. 213-224.
12. Яркин А.Н., Куликов Б.И., Швидченко Г.И. Границы области неустойчивости и период пульсаций в системе параллельных парогенерирующих каналов//Атомная энергия. – 1986. – Т. 60. – Вып. 1. – С. 19-23.
13. Урусов Г.Л., Трещев Г.Г., Кобзарь Л.Л., Завальский В.П. Устойчивость естественной циркуляции неравновесного пароводяного потока//Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика и техника ядерных реакторов. – М.: ЦНИИАтоминформ – 1987. – Вып. 2. – С. 21-26.
14. Малкин С.Д., Хабенский В.Б., Мигров Ю.А., Ефимов В.К., Волкова С.Н. Влияние аperiodической неустойчивости на динамику однофазного потока в параллельных обогреваемых каналах при малых скоростях теплоносителя//Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика и техника ядерных реакторов. – М.: ЦНИИАтоминформ. – 1987. – Вып. 2. – С. 27-33.
15. Зисман А.С., Орехов Ю.И., Пометько Р.С., Селиванов В.М., Сергеев Ю.А. Расходные характеристики и устойчивость естественной циркуляции в замкнутых системах/Сб. докл. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР»: Междунар. семинар «Теплофизика-90» (25-28 сентября 1990). – Обнинск: ОНТИ ФЭИ, 1999. – Т. 2. – С. 112-119.
16. Яркин А.Н. Гистерезисные явления в системе параллельных каналов/Сб. докл. «Гидродинамика и теплообмен в нестационарных условиях»: Междунар. конф. «Теплофизика-89» (21-23 ноября 1989). – Обнинск: ОНТИ ФЭИ, 1992. – С. 154-165.
17. Aritomi M., Chiang J.H., Nakahashi T., Wataru M., Mori M. Fundamental Study on Thermo-Hydraulics during Stop-Up in Natural Circulation Boiling Water Reactor, (I) Thermo-Hydraulics Instabilities//Nuclear Science and Technology. – 1992. – V. 29. – № 7. – P. 631-661.
18. Chiang J.H., Aritomi M. Fundamental Study on Thermo-Hydraulics during Stop-Up in Natural Circulation Boiling Water Reactor, (II) Natural Circulation Oscillation Induced by Hydrostatic Head Fluctuation//Nuclear Science and Technology. – 1993. – V. 30. – № 3. – P. 203-211.

19. Хабенский В.Б., Герлига В.А. Нестабильность потока теплоносителя в элементах оборудования. – СПб.: Наука, 1994.
20. Podowski M.Z., Rosa M.P. Modeling and Numerical Simulation of Oscillatory Two-phase Flows with Application to Boiling Water Nuclear Reactors//Nuclear Engineering and Design. – 1997. – V. 177. – № 2. – P. 179-184.
21. Zanicco P., Gimenez M., Delmastro D. Modeling Aspects in Linear Stability Analysis of a Self-Pressurized, Natural Circulation Integral Reactor//Nuclear Engineering and Design. – 2004. – V. 231. – № 3. – P. 283-301.
22. Koncoro H., Iwahashi K., Rao Y.F., Fukuda K. Experimental Study on the Stability Characteristics of Two-phase Flows in Parallel Boiling Channels under Natural-Circulation Conditions// International Conference on Nuclear Engineering, ASME. – 1996. – V. 1. – Part 1. – P. 373-383.
23. Иванов Е.Ф., Сорокин А.П., Иванов В.В., Богословская Г.П., Волков А.Д., Зуева И.Р., Рымкевич К.С. Экспериментальные исследования кипения жидкого металла в параллельных каналах в условиях естественной циркуляции/Препринт ФЭИ-3023. – Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ-ФЭИ, 2004.
24. Ninokata H., Okano T. SABENA: Subassembly Boiling Evaluation Numerical Analysis // Nuclear Engineering and Design. – 1990. – V. 120. – № 3. – P. 349-367.
25. Sorokin G., Ninokata H., Sorokin A., Endo H. Numerical Modelling of Liquid Metal Boiling in Parallel Channels under Natural Circulation Conditions // Proceeding «Hydrodynamics and Heat Transfer in Single and Two Phase Flow of Liquid Metals». 11-th International Meeting of the IAEH Working Group on Advanced Nuclear Reactors Thermal Hydraulics (5-9 July 2004). – Obninsk: SSC RF-IPPE, 2005.
26. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат, 1968.
27. Handbook of Thermodynamics and Transport Properties of Alkali Metals. Ed. R.W. Ohse. Oxford, B.S. Publ., 1985.
28. Быстров П.М., Казан Д.Н., Кречетова Г.А. и др. Тепловые трубы с жидкометаллическим охлаждением и энергетические установки. – М.: Наука, 1988.
29. Кириллов П.Л., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства жидкометаллических теплоносителей (справочные таблицы и соотношения): Обзор ФЭИ-0291. – М.: ЦНИИатоминформ, 2000.
30. Sorokin G., Sorokin A. Experimental and Numerical Investigations of Liquid Metal Boiling in Fuel Subassemblies under Natural Circulation Conditions//Accepted for publication in Special Volume of the Progress in Nuclear Energy, Great Britain, September 2005.
31. Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федынский О.С. Жидкометаллические теплоносители. – М.: Атомиздат, 1976.
32. Зейгарник Ю.А., Литвинов В.Д. Кипение щелочных металлов в каналах. – М.: Наука, 1983.

Поступила в редакцию 30.06.2005

УДК 621.311.25:621.039

Neutron and Physical Characteristics of the Khmel'nitsk-2 First Loading with Alternative-Design Fuel Assemblies at the Stages of Physical and Power Startup \ E.S. Saakov, V.P. Derij, A.M. Yakovlev, A.A. Kormilitsin, A.V. Klepov, M.H. Gashev, Yu.A. Krainov, V.I. Chmykhun, V.V. Sarbukov, O.V. Lebedev, V.V. Makeev, A.Yu. Belyakov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 13 pages, 9 tables, 3 illustrations. – References, 8 titles.

The papers cover the results of the research in the field of physical and neutron characteristics for Khmel'nitsk-2 first loading with alternative-design fuel assemblies at the stages of physical and power startup. The obtained experimental findings could be used to adjust the constants and software to be applied for design modeling of the fuel cycle at the stages of design and operation of the power reactors

УДК 621.039.55

Experimental Investigation of Hydraulic Characteristics of Tank Reactor Model \ E.F. Avdeev, I.A. Chusov, V.A. Levchenko, Yu.D. Levchenko, Yu.S. Yur'ev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 8 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 3 titles.

The results of experimental investigation of hydraulic characteristics of tank reactor model on «MP» installation are cited in the paper. Description of hydraulic model of two-loop tank type reactor plant is given. Experimental data cover wide range of installation performance parameters including emergency operational mode of reactor plant model with complete shut down of one feed-pump.

УДК 621.039.58

Experimental Investigations in Substantiation of Design Functions of the Passive System of Filtration of the Leaks to the NPP Annulus \ S.G. Kalyakin, A.A. Tsyganok; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 7 pages, 4 tables, 5 illustrations. – References, 4 titles.

Experimental investigations of heat transfer and heat power of the “air – air” heat exchanger – vent pipe of the passive filtration system are carried out. It's obtained that heat transfer between heating and cold air is increasing below $Re_h \gg 5 \cdot 10^3$ and when heating air flow is further rising the heat transfer ratio is remain constant. The temperature of the internal surface of the heat exchange pipe in the investigated range of the operating conditions is exceed 120 °C that provide full vaporization of the dropping aerosol before it hit on the filters.

УДК 621.039,534.6

Experimental and Numerical Modelling of Liquid Metal Boiling Heat Transfer in a System of Parallel Fuel Subassemblies under conditions of Natural Convection \ G.A. Sorokin, X. Ninokata, X. Endo, A.D. Efanov, A.P. Sorokin, E.F. Ivanov, G.P. Bogoslovskaya, V.V. Ivanov, A.D. Volkov, I.R. Zueva; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 15 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 32 titles.

The paper presents description of test facility and experimental data on boiling hydrodynamics and heat transfer obtained with eutectic sodium-potassium alloy in a system of two parallel heat generating subassemblies positioned in the natural circulation loop. Also the paper describes briefly the modified numerical model and numerical code for calculations of thermohydraulic characteristics in case of liquid metal boiling as within single subassembly and in a system of parallel subassemblies. It is shown that results of calculations are in a good agreement with experimental data. It is concluded that modeling of natural circulation thermohydraulics in reactor core allows the conditions of stable heat transfer to be determined and such phenomena as heat transfer crisis, fuel pin dryout, reactor core melting to be prevent in the mode of fast reactor emergency cooling up.