

*С.М.Дмитриев<sup>1</sup>, А.А.Кокурин<sup>2</sup>, Д.Г.Кресов<sup>2</sup>, А.В.Куприянов<sup>2</sup>*

Нижегородский государственный технический университет, Россия (1)

ФГУП «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И.Африкантова», Н. Новгород, Россия (2)

## **К ВОПРОСУ ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ЗАКРИЗИСНОГО РЕЖИМА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ НИЗКИХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ РАСХОДАХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

### **АННОТАЦИЯ**

Приводятся результаты экспериментальных исследований кризиса теплоотдачи на упрощенной электрообогреваемой сборке в условиях низких положительных и отрицательных расходах теплоносителя. Дается краткое описание характеристик сборки и методики проведения экспериментов. Отмечается неустойчивость местоположения кризиса теплоотдачи при отрицательных расходах, а также существенная зависимость результатов от значения входной температуры. Исследования представляют интерес для уточнения динамики ряда аварийных процессов.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

В судовых ядерных энергетических установках ряд аварийных режимов может сопровождаться «опрокидыванием» расхода в части каналов активной зоны.

Существенно, что в этих аварийных ситуациях описываемый режим циркуляции носит кратковременный характер. Вместе с тем, существующие корреляции не позволяют в полной мере осуществить строгий анализ динамики при опрокидывании расхода. Основная причина - в ограничении экспериментальной области исследований положительными массовыми скоростями 25-250 кг/(м<sup>2</sup>·с) [1, 2]. При этом работы, относящиеся к описанию теплоотдачи при отрицательных расходах, представляются недостаточными в силу либо чрезмерно упрощенной геометрии экспериментальных каналов [3, 4], либо в силу ограниченности параметрической области исследований, в частности, по давлению - при исследованиях повторного залива [5], не позволяющих сделать приемлемых обобщений.

В значительной мере этот пробел восполняется проведенными в ФГУП «ОКБМ им. И.И. Африкантова» экспериментами на семистержевой модели ТВС, являющимися продолжением работ, обобщенных в [6, 7].

Новые экспериментальные результаты (проведено около 30 экспериментов) получены для массовых скоростей от 100 до 600 кг/(м<sup>2</sup>·с) и от минус 120 до минус 600 кг/(м<sup>2</sup>·с). Эксперименты проведены при фиксированном давлении 15,7 МПа и значениях входной температуры 200, 230 и 260°С.

### **2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА**

Экспериментальное исследование закризисного температурного режима тепловыделяющих элемен-

тов проводилось на электрообогреваемом теплофизическом стенде. Модель ТВС представляет собой семистержевой пучок пустотелых имитаторов тепловыделяющих элементов, заключенный в необогреваемый шестигранный кожух с размером «под ключ» 19,2 мм, который в свою очередь размещен в прочном корпусе. В качестве имитаторов тепловыделяющих элементов использовались гладкостержневые четырехзаходные оребренные трубки описанным диаметром по ребрам 7,0 мм, обогреваемой длиной 950 мм и толщиной стенки 0,3 мм. Ребра играют роль дистанционирующих элементов (дистанционирование «ребро по ребру»), а также закручивают поток теплоносителя (шаг закрутки 400 мм). Распределение тепловыделения по объему пучка - равномерное.

Контроль температуры имитаторов твэл на этой модели осуществлялся четырехточечными термозондами, свободно опущенными в центральные газовые полости твэл на различных по высоте уровнях обогреваемого участка.

Погрешности измерения основных параметров составили:

давление теплоносителя –  $\pm 1,5\%$ ;

расход теплоносителя –  $\pm 2,5\%$ ;

температура теплоносителя на входе в модель ТВС –  $\pm 1$  °С;

температура внутренней полости имитатора –  $\pm 6$ °С;

мощность модели ТВС –  $\pm 3\%$ .

### **3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Методически эксперименты проводились следующим образом. При стабилизированных заданных значениях режимных параметров теплоносителя (давлении, температуры теплоносителя на входе в ТВС и расходе) модель ТВС выводилась в режим кризиса теплоотдачи ступенчатым повышением подводимой электрической мощности. Каждый наброс мощности составлял 2 - 5% ее текущего значения. На каждой ступени после стабилизации режима фиксировались значения параметров теплоносителя и температур имитаторов элементов. Мощность увеличивалась до значения, при котором максимальная температура внутри имитаторов достигала 600-700 °С. Затем мощность постепенно уменьшалась (также ступенями со стабилизацией режима и фиксацией параметров на каждой ступени), что

позволяло сделать вывод о наличии или отсутствии немонотонности в «кривой кипения».

#### 4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные по зависимости критической мощности от массовой скорости приведены на рис. 1.

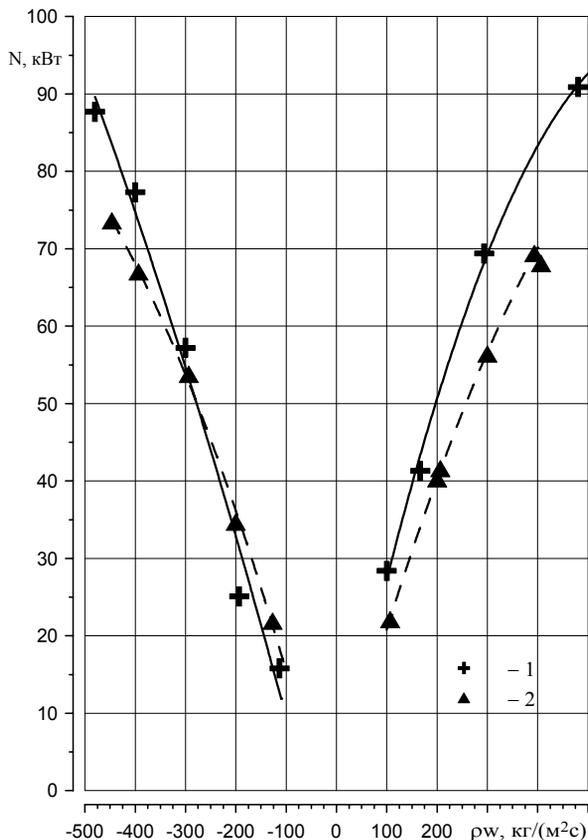


Рис. 1. Зависимость критической мощности от массового расхода теплоносителя: 1 – при  $t_{\text{вх}} = 200^\circ\text{C}$ ; 2 – при  $t_{\text{вх}} = 260^\circ\text{C}$

Результаты исследования показали, что существует ряд особенностей, коррелируемых с температурой теплоносителя на входе в ТВС.

При температурах теплоносителя на входе в модель ТВС 200 и  $230^\circ\text{C}$  получены хорошие результаты по «сшиваемости» с проведенными ранее экспериментами. При этом ранее полученная зависимость критической мощности от массового расхода в условиях прямой циркуляции хорошо экстраполируется на область низких расходов. Это позволяет использовать в новой области разработанные и представленные в [6] корреляции (что подтверждается верификационными расчетами).

Следует отметить, что при прямой циркуляции (в том числе, в области малых расходов теплоносителя) кривая кипения находится в соответствии с классической (для труб) однозначной зависимостью теплового потока от температурного перепада.

При обратной циркуляции в области малых расходов теплоносителя – до  $300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  при  $T_{\text{вх}} = 200^\circ\text{C}$  и до  $200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  при  $T_{\text{вх}} = 230^\circ\text{C}$  – зависимость теплового потока от температурного пере-

пада носила неоднозначный характер. А именно, при переходе на больший уровень мощности кризис теплоотдачи (наблюдаемый по показаниям соответствующих термодатчиков) смещался по азимуту сборки (рис. 2).

$N$ , кВт

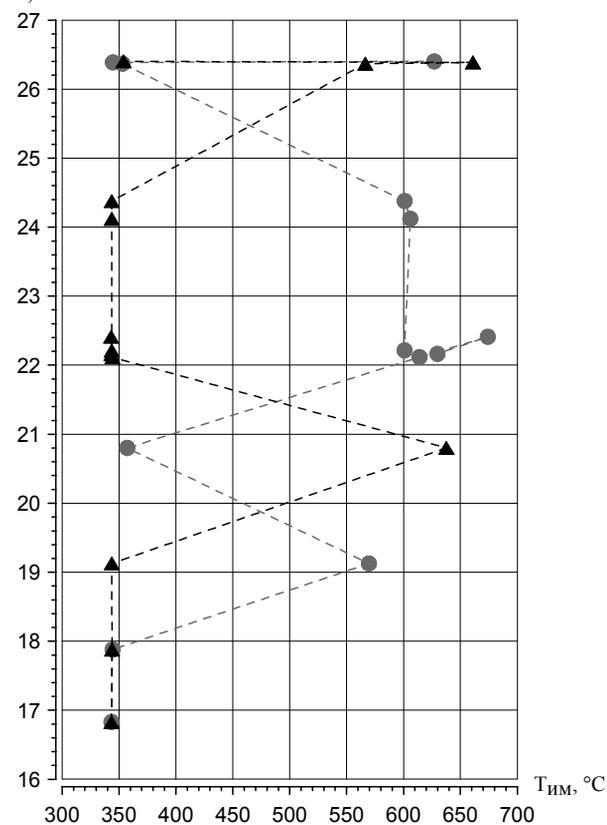


Рис. 2. Зависимость температур двух симметрично расположенных относительно центра сборки имитаторов от подводимой мощности при  $t_{\text{вх}} = 200^\circ\text{C}$  и массовом расходе минус  $113 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

Интересно отметить, что «смена» режимов происходила в периферийных твэлах, расположенных симметрично относительно центра сборки. При этом закризисный режим в центральном твэле либо не реализовался, либо фиксировалось незначительное повышение температур ( $\sim 50^\circ\text{C}$ ). В ряде случаев наблюдалась миграция «пятна кризиса» во времени (при фиксированных внешних параметрах).

Полученные результаты, по-видимому, свидетельствуют о реализации (для вышеприведенной области параметров) граничных условий между различными режимами течений. Оценки, выполненные по методике Б.К. Козлова (цитируется по [8]) для адиабатного течения, показали, что (в следующих двух абзацах названия режимов соответствуют принятым автором методики):

- для температуры входа  $200^\circ\text{C}$  теплогидравлические характеристики потока находятся на границе между «эмульсионным» и «пленочно-эмульсионным» режимами течения при массовом расходе  $300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  и между «пробково-диспергированным» и «эмульсионным» при массовом расходе  $113 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;

- для температуры входа 230°C теплогидравлические характеристики потока находятся на границе между «пленочно-эмульсионным» и «капельным» режимами течения при массовом расходе 200 кг/(м<sup>2</sup>·с) и между «пробково-диспергированным» и «эмульсионным» при массовом расходе 133 кг/(м<sup>2</sup>·с).

Таким образом, с ростом энтальпии диапазон расходов, для которого возможны переходы между различными режимами течения, сокращается. При этом со снижением расхода возрастает вероятность реализации снарядного (по современной классификации) режима течения.

При входной температуре 260°C местоположение кризиса при изменении нагрузки не сопровождается переходами по сечению модели ТВС как при прямом, так и при обратном расходе.

Исследования подтвердили ранее полученные результаты [6] (качественно и количественно) в части величины закризисного резерва по мощности (определяемого как отношение мощности, соответствующей допустимой температуре, к критической мощности) при ограничении допустимой температуры среды внутри имитаторов величиной ~ 600 °С. Здесь определяющее значение оказывает температура теплоносителя на входе в ТВС. При этом получено слабое влияние направления расхода через сборку на закризисный резерв.

Закризисный резерв по мощности в режимах при прямой циркуляции теплоносителя в среднем составил:

- 1,15 - для  $t_{вх} = 200$  °С;
- 1,19 - для  $t_{вх} = 230$  °С;
- 1,29 - для  $t_{вх} = 260$  °С.

Закризисный резерв по мощности в режимах при обратной циркуляции теплоносителя в среднем составил:

- 1,17 - для  $t_{вх} = 200$  °С;
- 1,20 - для  $t_{вх} = 230$  °С;
- 1,26 - для  $t_{вх} = 260$  °С.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обсуждая полученные экспериментальные результаты в закризисной области, необходимо отметить заметную неидентичность показаний термомпар в одном и том же высотном слое (в некоторых режимах достигающих 100-150°C), что вызвано присутствием малостержневой ТВС значительной неравномерностью теплогидравлических характеристик

по сечению сборки и затрудняющей методическое обобщение экспериментов. Поэтому с целью повышения представительности экспериментов представляется целесообразным дополнить полученных результатов аналогичными исследованиями на ТВС с большим количеством имитаторов.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТВС – тепловыделяющая сборка;

$t_{вх}$  – температура теплоносителя на входе в ТВС, °С;

$T_{им}$  – температура имитатора твэла, °С.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ефанов А.Д., Кириллов П.Л., Смогалева И.П., Ивашкевич А.А., Виноградов В.Н., Сергеев В.В., Греневельд Д., Леунг Л.** Скелетная таблица для коэффициента теплоотдачи в закризисной области при течении воды в трубе // Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР: Тр. Междунар. конф. Т. 1 / Под ред. А.Д.Ефанова. С. 295 (Теплофизика-98, Обнинск, 26-29 мая, 1998).
2. **Гущин Е.В., Ефанов А.Д., Колмаков А.П., Ложкин В.В., Смирнов А.М.** Эксперименты на электрообогреваемых моделях ТВС ВВЭР для верификации кодов по кризису теплообмена и подогревам в ячейках ТВС // Теплогидравлические коды для энергетических реакторов (разработка и верификация): Тез. докл. отраслевой конф. Под ред. А.Д.Ефанова, П.Л.Кириллова, 2001, с. 20 (Обнинск, 29-31 мая, 2001).
3. **Barnett P.G.**, An Investigation into the Validity of Certain Hypotheses Implied by Various Burnout Correlations, U.K. Pert. AEEW-R 214, 1963.
4. **Морозкин В.М., Аменицкий А.И., Аладьев И.Т.**, Экспериментальное исследование влияния ускорения на кризис кипения в жидкостях при температуре насыщения // ТВТ. 1963. № 1. С. 107.
5. **Ложкин В.В., Судницын О.А., Куликов Б.И.** Результаты экспериментального исследования по повторному охлаждению на моделях ТВС реактора ВВЭР при заливе сверху и комбинированном заливе // Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР: Тр. Междунар. конф. Т. 1 / Под ред. А.Д.Ефанова, с. 381 (Теплофизика-98, Обнинск, 26-29 мая, 1998).
6. **Самойлов О.Б., Куприянов А.В., Нагаев И.А., Дмитриев С.М.** Экспериментальные исследования закризисного теплообмена на электрообогреваемой модели ТВС // Атомная энергия. 2000. Т. 88. Вып. 4. С. 257-260.
7. **Дмитриев С.М., Кресов Д.Г., Куприянов А.В.** К вопросу об оптимизации полномасштабных экспериментов по кризису теплоотдачи, основанной на топологических особенностях кривой кипения // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2001. Вып. 4. С. 55-58.
8. **Тонг Л.** Теплоотдача при кипении и двухфазное течение. М.: Мир, 1969. С. 71-72.