

УДК 621.039.51

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КРИЗИСА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ НИЗКИХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ РАСХОДАХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

С.М. Дмитриев*, А.А. Кокурин, Д.Г. Кресов**, А.В. Куприянов****

** Нижегородский государственный технический университет, г. Н. Новгород*

*** ФГУП «Опытное конструкторское бюро машиностроения
им. И.И. Африкантова», г. Н. Новгород*



Представлен предварительный анализ результатов, полученных при экспериментальных исследованиях кризиса теплоотдачи в условиях прямого и обратного расходов через упрощенную модель тепловыделяющей сборки.

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 по теплоотдаче не позволяют в полной мере осуществить строгий анализ динамики при опрокидывании расхода из-за ограничения экспериментальной области исследований положительными массовыми скоростями 25–250 кг/(м²·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 семистержневой модели ТВС, являющимися продолжением работ, результаты которых обобщены в [6, 7].

Новые экспериментальные результаты (проведено 35 экспериментов) получены для массовых скоростей от 100 до 600 кг/(м²·с) и от минус 120 до минус 600 кг/(м²·с). Эксперименты проведены при фиксированном давлении 15,7 МПа и значениях входной температуры воды 200, 230 и 260°C.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальное исследование закризисного температурного режима тепловыделяющих элементов проводилось на электрообогреваемом теплофизическом стен-

© С.М. Дмитриев, А.А. Кокурин, Д.Г. Кресов, А.В. Куприянов, 2006

де. Модель ТВС представляет собой семистержневой 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 твэлов на этой модели осуществлялся четырехточечными термозондами, свободно опущенными в центральные газовые полости имитаторов 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 $\pm 1^\circ\text{C}$;
- температура стенки имитатора $\pm 6^\circ\text{C}$;
- мощность модели ТВС $\pm 3\%$.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Методически эксперименты проводились следующим образом. При стабилизированных заданных значениях режимных параметров теплоносителя (давлении P , температуры на входе $t_{\text{вх}}$ и расходе G) модель ТВС выводилась в режим кризиса теплоотдачи ступенчатым повышением подводимой электрической мощности. Каждый наброс мощности составлял 2–5% от 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 $600\text{--}700^\circ\text{C}$. Затем мощность уменьшалась также ступенями со стабилизацией режима и фиксацией параметров на каждой ступени.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные по зависимости критической мощности от массовой скорости приведены на рис. 1–3.

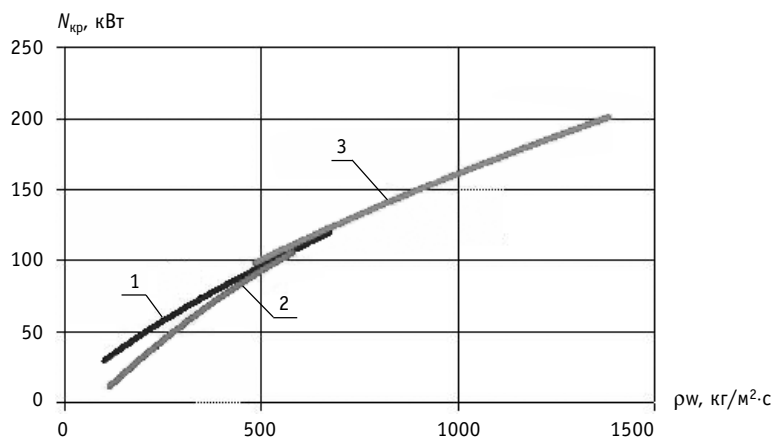


Рис. 1. Зависимость критической мощности от массового расхода теплоносителя при $t_{\text{вх}} = 200^\circ\text{C}$: 1 – прямая циркуляция теплоносителя; 2 – обратная циркуляция теплоносителя; 3 – ранее проведенные эксперименты при прямой циркуляции теплоносителя

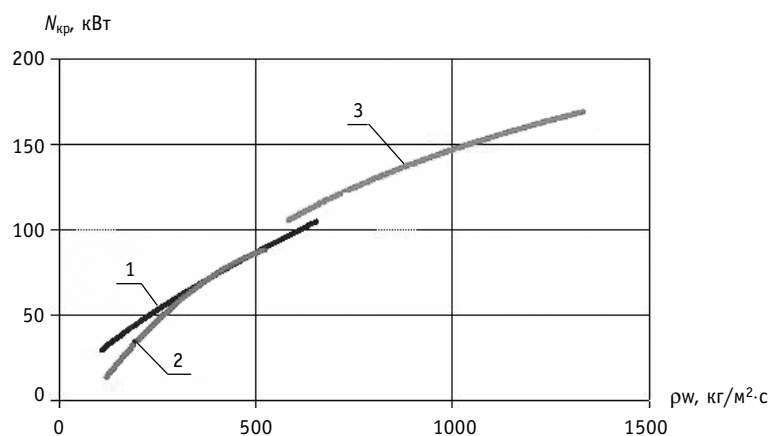


Рис. 2. Зависимость критической мощности от массового расхода теплоносителя при $t_{вх} = 230^\circ\text{C}$: 1 – прямая циркуляция теплоносителя; 2 – обратная циркуляция теплоносителя; 3 – ранее проведенные эксперименты при прямой циркуляции теплоносителя

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

При температурах теплоносителя на входе в модель ТВС 200 и 230°C получены хорошие результаты по «сшиваемости» с проведенными ранее экспериментами, и ранее полученная зависимость критической мощности от массового расхода в условиях прямой циркуляции хорошо экстраполируется на область низких расходов, что позволяет использовать разработанные и представленные в [6] корреляции (подтверждается верификационными расчетами). В условиях обратной циркуляции наблюдается усиление обсуждаемой зависимости, ее несимметрия относительно нулевого расхода.

Следует отметить, что при прямой циркуляции (в том числе в области малых расходов теплоносителя) кривая кипения находится в соответствии с классической од-

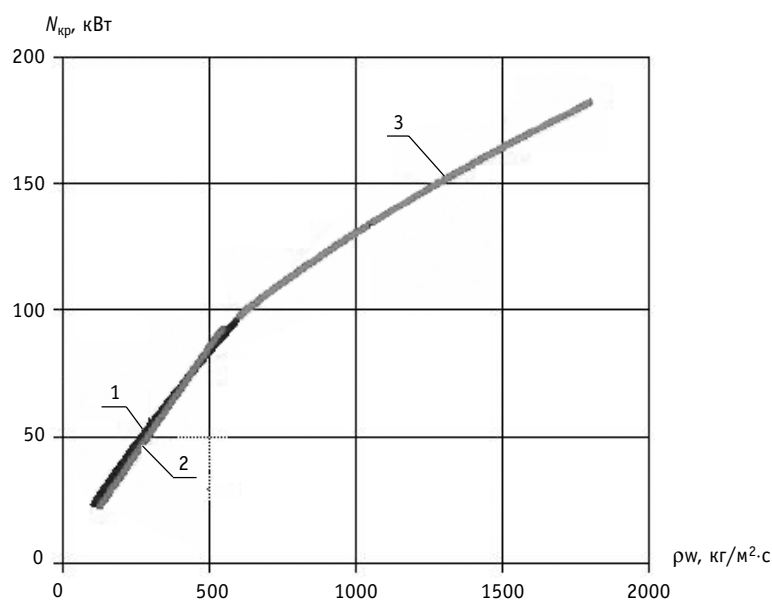


Рис. 3. Зависимость критической мощности от массового расхода теплоносителя при $t_{вх} = 260^\circ\text{C}$: 1 – прямая циркуляция теплоносителя; 2 – обратная циркуляция теплоносителя; 3 – ранее проведенные эксперименты при прямой циркуляции теплоносителя

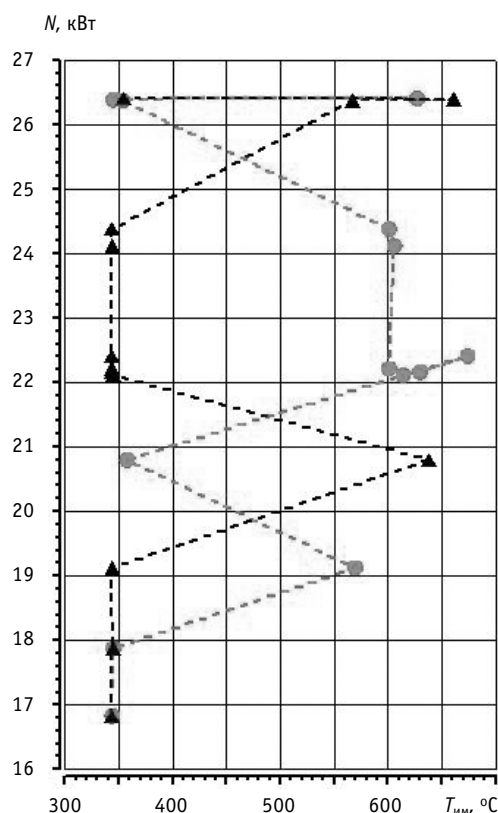


Рис. 4. Зависимость температур двух симметрично расположенных относительно центра сборки имитаторов от подводимой мощности при $t_{\text{вх}} = 200^\circ\text{C}$ и массовом расходе минус $100 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$

ные по методике Б.К. Козлова (цитируется по [8]) для адиабатного течения, показали, что в высокотемпературной области переходного кипения (температура имитаторов $500\text{--}550^\circ\text{C}$):

- для температуры входа 200°C теплогидравлические характеристики потока находятся на границе между «эмульсионным»² и «пленочно-эмульсионным» режимами течения при массовом расходе $300 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ и между «пробково-диспергированным» и «эмульсионным» при массовом расходе $113 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$;
- для температуры входа 230°C теплогидравлические характеристики потока находятся на границе между «пленочно-эмульсионным» и «капельным» режимами течения при массовом расходе $200 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ и между «пробково-диспергированным» и «эмульсионным» при массовом расходе $133 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$.

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 симметрия критической мощности относительно нуля расхода сохраняется. Местоположение кризиса при изменении нагрузки не сопровождается переходами по сечению модели ТВС как при прямом, так и при обратном расходе.

нозначной зависимостью теплового потока от температурного перепада.

При обратной циркуляции в области малых расходов теплоносителя – до $300 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ при $T_{\text{вх}} = 200^\circ\text{C}$ и до $200 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ при $T_{\text{вх}} = 230^\circ\text{C}$ – зависимость теплового потока от температурного перепада носило неоднозначный характер. А именно, при переходе на больший уровень мощности кризис теплоотдачи (наблюдаемый по показаниям соответствующих термодатчиков) смещался по азимуту сборки¹ (рис. 4). Интересно отметить, что «смена» режимов происходила в периферийных имитаторах твэлов, расположенных симметрично относительно центра сборки. При этом закризисный режим в центральном имитаторе 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

¹ Суждение о возможном перемещении пятна кризиса по высоте сборки затруднено из-за чрезмерно большого расстояния между термодатчиками ($\sim 200 \text{ мм}$) в описываемых экспериментах.

² Здесь названия режимов соответствуют принятым автором методики.

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 $\sim 600^\circ\text{C}$. Здесь определяющее значение оказывает температура теплоносителя на входе в ТВС. При этом получено слабое влияние направления расхода через сборку на закризисный резерв по мощности.

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

- 1,15 для температуры на входе $t_{\text{вх}} = 200^\circ\text{C}$;
- 1,19 для температуры $t_{\text{вх}} = 230^\circ\text{C}$;
- 1,29 для температуры $t_{\text{вх}} = 260^\circ\text{C}$.

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

- 1,17 для температуры на входе $t_{\text{вх}} = 200^\circ\text{C}$;
- 1,20 для температуры $t_{\text{вх}} = 230^\circ\text{C}$;
- 1,26 для температуры $t_{\text{вх}} = 260^\circ\text{C}$.

Обсуждая полученные экспериментальные результаты в закризисной области, необходимо отметить заметную неидентичность показаний термопар в одном и том же высотном слое (в некоторых режимах достигающих $100\text{--}150^\circ\text{C}$), что вызвано очевидной для малостержневой ТВС сильной неравномерностью теплообмена по сечению сборки. Поэтому представляется целесообразным дополнение полученных результатов аналогичными исследованиями на ТВС с большим количеством имитаторов.

Особое внимание следует уделить задаче корректного использования полученных результатов для отрицательных расходов, имея в виду отсутствие двухжидкостных расчетных кодов, верифицированных под рассматриваемую задачу. Для этой цели предполагаются специальные уточнения корреляций, ориентированные на специфику однофазных моделей.

Литература

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: Труды Международной конф. «Теплофизика-98» (Обнинск, 26-29 мая, 1998 г.). – Т. 1/Под ред. А.Д. Ефанова. – Обнинск, 1998. – С. 295.
2. Гуцин 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. (Обнинск, 29-31 мая, 2001)./Под ред. А.Д. Ефанова, П.Л. Кириллова. – Обнинск, 2001. – С. 20.
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. – № 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: Труды Международной конф. «Теплофизика-98» (Обнинск, 26-29 мая, 1998 г.). – Т. 1/Под ред. А.Д. Ефанова. – Обнинск, 1998. – С. 381.
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 эк-

спериментов 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.

Поступила в редакцию 21.04.2006

УДК 621.039.54

Calculation of the Decay Power in Used Fuel and Radioactive Waste Products \O.B. Duginov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 7 pages, 2 illustrations. – References – 7 titles.

The method of direct calculation of the decay power in used fuel and radioactive waste products based on present isotopic composition is considered in this paper.

УДК 621.039.534

Heat Emission From Lead Heat-Transfer to Longitudinal Circulated Pipe \A.V. Beznosov, A.A. Molodtsov, A.V. Semyonov, A.V. Nazarov, S.U. Savinov, O.O. Kudrin, V.I. Rachkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 8 pages, 6 illustrations. – References – 1 title.

The results of experimental research of the local characteristics of the heat emission from the lead heat-transfer to longitudinal circulated cooled pipe placed in annular gap are presented. Experimental investigations were conducted under conditions of change and control of oxygen admixture concentration in the range of conditions typical for heavy liquid metal coolant power circuits. The research target is valid design formulas for engineering calculation of the heat-exchange surfaces. The investigations were carried out under following conditions: lead temperature 400-500°C, coolant average speed 0.1-1.5 m/s, Pr number meaning 0.0123-0.021, Pe number meaning 500-700. The heat flow changes were in range 35-80KW/m². The controlled oxygen admixture concentration was changed in range 10⁻⁵-10⁻⁴ to 10⁰ thermodynamic oxygen activity and above the oxygen admixture saturation caused plumbic ochre deposition on heat-exchange surface.

УДК 621.039.51

Some Results of Experimental Investigations of Boiling Crisis at the Low and Negative Coolant Discharge \S.M. Dmitriev, A.A. Kokurin, D.G. Kresov, A.V. Kuprijanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 6 pages, 4 illustrations. – References – 8 titles.

The preliminary analysis of results received at experimental investigations of boiling crisis under conditions of the direct and reverse water discharge through simplified model of heat-generating assembly is submitted.

УДК 61:544.582

Radionuclide Impurities in Albumin ¹⁶⁶Ho-Microspheres Irradiated by Thermal Neutrons \V.M. Petriev, M.Yu. Orlov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 8 pages, 3 illustrations, 5 tables. – References – 18 titles.

State Institution Medical Radiological Research Center RAMS, Obninsk, Russia

The possibility is demonstrated to obtain albumin micro-spheres labeled with ¹⁶⁶Ho. These micro-spheres are the potential preparation for intra-tissue radionuclide therapy of malformations. The labeled micro-spheres are obtained from the micro-spheres containing stable ¹⁶⁵Ho. The activities are estimated of other radionuclides which can be formed during thermal neutron irradiation of micro-spheres. The activity of ¹⁶⁶Ho is growing with the increase of stable ¹⁶⁵Ho concentration in the micro-spheres and with the irradiation time increase.

It was demonstrated that the activities all other radioactive impurities formed are negligible in comparison with ¹⁶⁶Ho activity. The calculations were performed for ¹⁶N, ¹⁹O, ²⁰F, ³⁷S, ³⁸Cl, ¹⁶²Tb, ³³P, ³⁵S, ³H, ^{166m}Ho. The radiochemical admixtures which generated by the neutron activation of lanthanides containing in the used Ho are insignificant also

The irradiation time was estimated which is necessary for the activity equal to 80% from the saturation activity. This time is equal to 3 – 4 days for neutron flux density equal to 5.10¹³ 1/cm².s.

The low values of impurity activity is connected with the low activation cross sections and low abundance of these nuclides.