

ТЕПЛООТДАЧА ОТ СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ К ПРОДОЛЬНО ОБТЕКАЕМОЙ ТРУБЕ

**А.В. Безносов*, А.А. Молодцов*, А.В. Семенов*, А.В. Назаров*,
С.Ю. Савинов*, О.О. Кудрин*, В.И. Рачков****

*Нижегородский государственный технический университет,
г. Нижний Новгород

**Федеральное агентство по атомной энергии, г. Москва



Представлены результаты экспериментальных исследований локальных характеристик теплоотдачи от свинцового теплоносителя к поверхности охлаждаемой трубы в кольцевом зазоре при контроле и изменении содержания примеси кислорода в диапазоне условий энергетических контуров с тяжелым жидкотекущим теплоносителем. Цель работы – получение обоснованных расчетных формул для инженерных расчетов поверхностей теплообмена. Исследования проводились при изменении содержания примеси кислорода с образованием отложений оксида свинца вблизи теплопередающей поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

Проектные проработки энергетических контуров с использованием тяжелых жидкотекущих теплоносителей (ТЖМТ) в реакторах деления ядер, в жидкотекущих мишенях и миенных контурах ускорительно-управляемых систем, в системах теплоотвода ядерных термоядерных реакторов токамаков инициировали работы по уточнению соответствующих расчетных кодов теплообмена, созданных в 50 – 80 годах прошлого века. Более глубокое понимание физико-химических процессов в системах с ТЖМТ и накопленный опыт эксплуатации таких систем формируют новое, уточненное понимание состояния пристенной области, в значительной мере определяющих характеристики теплообмена между жидким металлом и стенкой конструкционного материала. Появились новые, современные средства контроля характеристик ТЖМТ и современная экспериментальная техника с компьютеризированной обработкой экспериментальных данных. Все это в комплексе делает возможным уточнение ранее созданных соответствующих расчетных кодов с учетом специфики каждого теплоносителя, направления тепловых потоков, реального исполнения теплообменного оборудования и контура в целом, режимов его эксплуатации, включая возможные изменения содержания примесей в теплоносителе и в контуре.

Обязательным условием получения объективных характеристик теплообмена в оборудовании с ТЖМТ являются исследования следующих взаимосвязанных процессов:

© А.В. Безносов, А.А. Молодцов, А.В. Семенов, А.В. Назаров, С.Ю. Савинов,
О.О. Кудрин, В.И. Рачков, 2006

- теплообмена между ядром потока и теплообменными поверхностями с учетом эксплуатационных физико-химических состояний и состава оксидных защитных покрытий, отложений примесей на теплообменных поверхностях и концентрации частиц примесей в пристенной области с температурой и вязкостью ТЖМТ, отличающейся от аналогичных значений в ядре потока;
- массопереноса примесей, транспортируемых потоком теплоносителя в разветвленном циркуляционном контуре и массообмена примесей между ядром потока и пристенными областями отдельных участков неизотермического контура;
- гидродинамику потока в локальных участках контура, определяющую динамику накопления и количества примесей в пристенной области этих участков.

Расчетно-теоретические исследования характеристик теплообмена жидкокометаллических теплоносителей постулируют непосредственный контакт теплоносителя с поверхностью теплообмена и независимость характеристик теплообмена от направления теплового потока. Результаты большинства таких исследований применительно к условиям теплоотвода от жидкого металла к стенке можно разделить на две группы.

В первой группе критериальные зависимости теплообмена формируются в виде:

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot B, \quad (1)$$

где A – постоянный коэффициент, n – показатель степени ($0,35–1,0$), B – функция геометрических характеристик.

Во второй группе (более поздние исследования) критериальные зависимости теплообмена формируются в виде:

$$Nu = A + K \cdot Re^n \cdot B, \quad (2)$$

где A – постоянный коэффициент ($2,19–7,0$), K – постоянный коэффициент, n – показатель степени ($0,6–1,0$), B – функция геометрических характеристик.

Погрешность зависимостей типа (1) и (2) определяется их авторами не менее 15%. Все вышеприведенные зависимости игнорируют реальные эксплуатационные состояния теплоносителя и контура, содержащих дисперсные частицы примесей оксидов теплоносителя, соединения конструкционных материалов и газов.

Эти примеси могут откладываться на теплопередающих поверхностях и концентрироваться в пристенной области. На эти процессы влияют состав и характеристики теплопередающей поверхности, направление теплового потока, гидродинамика в локальных участках контура, содержание, свойства, состав растворенных примесей и их частиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Целью экспериментальных и расчетно-теоретических исследований характеристик теплообмена от ТЖМТ к продольно обтекаемой трубе являлось уточнение расчетных формул с учетом режимных эксплуатационных характеристик теплоносителя и контура.

Исследования проводились в Нижегородском государственном техническом университете силами и средствами кафедры «Атомные, тепловые станции и МИ»

Характеристики теплообмена исследовались при следующих условиях: температура свинца $400–500^{\circ}\text{C}$, средняя скорость теплоносителя $0,1–1,5 \text{ м/с}$, диапазон чисел Прандтля $0,0123–0,0211$ и чисел Пекле $500–7000$. Величина теплового потока изменилась в диапазоне $35–80 \text{ КВт/м}^2$. Содержание примеси кислорода изменялось от величины термодинамической активности кислорода от $10^{-5}–10^{-4}$ до 10^0 и выше насыщения с образованием отложений оксида свинца, в том числе и на теплопередающей поверхности.

Исследования проводились с использованием двух жидкокометаллических циркуляционных стендов одновременно. Циркуляционные контуры свинцового и свинец-висмутового теплоносителей объединялись экспериментальным участком. Такое техническое решение позволяет производить исследования локальных характеристик теплообмена последовательно от свинца к стенке, от эвтектики свинец-висмут к стенке, от электрообогреваемой стенки к свинцу и от электрообогреваемой стенки к свинец-висмуту.

Характеристики контура свинцового теплоносителя: расход свинца до $7 \text{ м}^3/\text{ч}$, температура свинца до 600°C , мощность электронагревателей до 50 кВт, напор циркуляционного электронасоса (разработка и поставка НГТУ) с частотным регулированием оборотов до 8 кгс/см 2 , материал оборудования, трубопроводов и арматуры сталь типа 12Х18Н10Т.

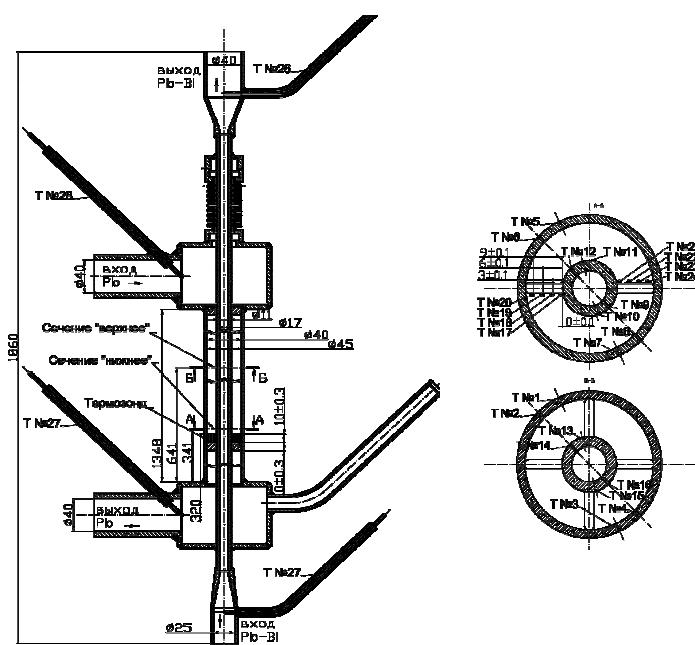


Рис. 1. Схема экспериментального участка и заделки термопреобразователей

Характеристики контура свинец-висмутового теплоносителя: расход теплоносителя до $10 \text{ м}^3/\text{ч}$, температура теплоносителя до 600°C , мощность электронагревателей с учетом прямого токового нагрева до 0,6 МВт, напор циркуляционного электронасоса (тип ЦН-17Ф) с частотным регулированием оборотов до 10 кгс/см 2 , материал оборудования, трубопроводов и арматуры сталь типа 12Х18Н10Т.

Оба контура снабжены системой дозированного ввода газообразного кислорода, магнитными расходомерами, устройствами измерения электрических характеристик защитных покрытий и отложений примесей, датчиками контроля термодинамической активности кислорода в ТЖМТ поставки ГНЦ РФ-ФЭИ.

Экспериментальный участок (рис. 1) выполнен в виде вертикально ориентированных коаксиально расположенных труб ($d_2/d_1 = 2.35$). Внешняя труба длиной 1348 мм, $45 \times 2,5$ мм изготовлена из аустенитной стали 12Х18Н10Т. Внутренняя труба длиной 1674 мм, 17×3 мм изготовлена из ферритно-мартенситной стали 10Х9НСМФБ. На расстоянии 1034 мм от входа свинца в кольцевой зазор устанавливается термозонд, состоящий из 8 микротермопар с диаметром спая 1,0 мм (в капилляре) с индивидуаль-

ной градуировочной характеристикой (погрешность градуировки $0,2^{\circ}\text{C}$).

В двух сечениях экспериментального участка установлено по 8 микротермопар (в капилляре) с индивидуальной градуировочной характеристикой (погрешность градуировки $0,2^{\circ}\text{C}$).

Для определения локального теплового потока в каждом из двух сечений устанавливаются по два микротермопреобразователя на «наружной» поверхности трубы через 180° по периметру и по два микротермопреобразователя – на «внутренней» поверхности трубы.

Чтобы уменьшить показатель тепловой инерции термопреобразователя, хромель-алюмелевый спай выполнен на поверхности капилляра, а чувствительная часть датчика прокатана до диаметра 0,5 мм. Для измерения температуры на «наружной» и «внутренней» поверхностях труб в исследуемых сечениях фрезеруются пазы шириной $0,5^{+0,03}$ мм, которые после укладки и зачеканивания микротермопреобразователя металлизируются. Глубина каждого паза до закладки термопреобразователя измерялась.

На входе и на выходе каждого теплоносителя установлены погружные термопреобразователи.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Схема тепломассообменных потоков одной из серий экспериментов представлена на рис. 2.

Интересные результаты были получены в первой серии испытаний, в начальный момент которой все внутренние поверхности смонтированного контура свинцового теплоносителя имели покрытия «в состоянии поставки» и сформированные в составе контура в течение 12-часовой выдержки в среде воздуха при температуре 550°C .

График характеристик контура в процессе всех этапов этой серии испытаний приведен на рис. 3.

На первом этапе этой серии через 5 ч от начала циркуляции теплоносителя в газовую систему был подан водород и его давление $1,02 \text{ кгс}/\text{см}^2$ поддерживалось в течение 20 ч.

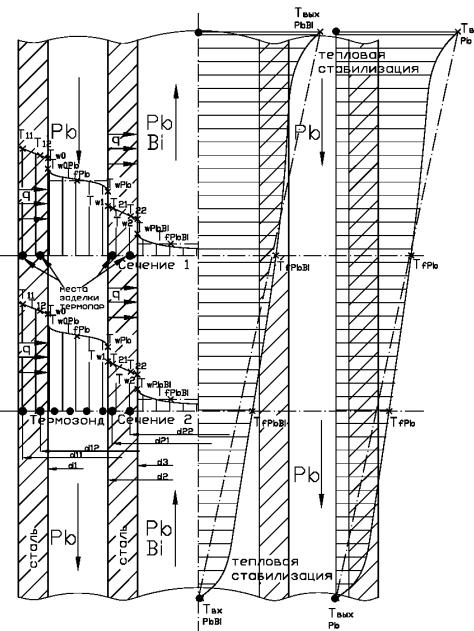


Рис. 2. Схема тепломассообменных потоков

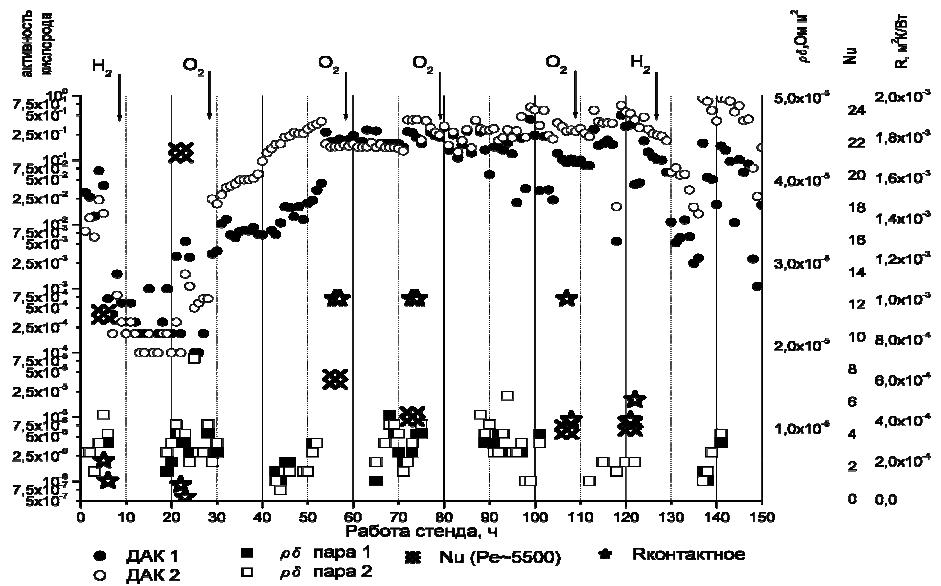


Рис. 3. Сводные данные проведенных исследований

На последующих этапах в газовую систему периодически дозировано подавался газообразный кислород в составе воздуха с последующей продувкой и выдержкой в среде аргона. Суммарная масса введенного в контур кислорода в этой серии составила 100г.

Анализ результатов исследований локальных характеристик теплообмена в этой серии испытаний показывает (рис. 4), что на начальном этапе испытаний, непосредственно после заполнения контура свинцом при содержании в нем кислорода $a \approx 10^{-3} - 10^{-2}$ экспериментальные данные располагались вблизи кривой

$$Nu = 3 + 0,015 \cdot Pe^{0.8}. \quad (3)$$

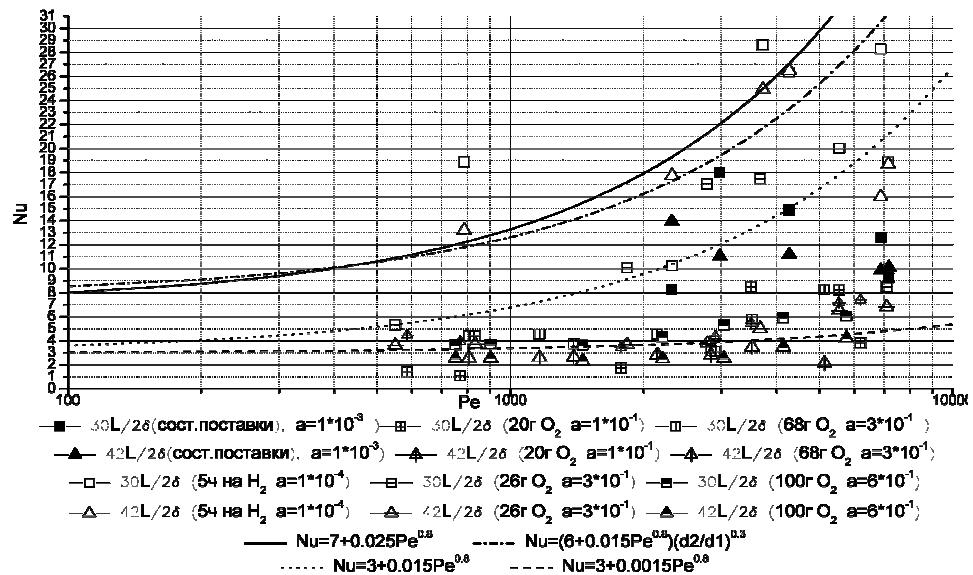


Рис. 4. Зависимости локальных характеристик теплообмена, сводный график

После обработки теплоносителя и контура водородом при температуре свинца в контуре около 550°C в течение 20 ч зафиксировано раскисление свинца до $a = 10^{-4}$. Характеристики теплообмена значительно улучшились, величина контактного термического сопротивления приблизилась к 5–7 градусам. Значения чисел Нуссельта находились вблизи кривой, описываемой выражением

$$Nu = 7 + 0,025 \cdot Re^{0.8}. \quad (4)$$

Последующий ввод кислорода привел к значительному ухудшению характеристик теплообмена (рис. 4). В конце этой серии испытаний, после ввода в контур 100 г кислорода значение контактного термического сопротивления превысило 20°C , а экспериментальные данные расположились вблизи кривой описываемой формулой

$$Nu = 3 + 0,0015 \cdot Re^{0.8}. \quad (5)$$

На рис. 5 представлены профили абсолютных температур по сечению потока теплоносителя, соответствующих ситуациям, описываемым зависимостями (3) и (4) соответственно. Таким образом, перепад температуры в пристенной области с появлением отложений на теплопередающих поверхностях может увеличиваться в 3,5 раза. На рис. 6 представлены результаты аналогичных испытаний [1] с тепловым потоком, направленным от электрообогреваемой трубы к свинцовому теплоносителю.

Эти результаты показывают, что при «раскисленом» свинцовом теплоносителе ($a \approx 10^{-4}$), характеристики теплообмена при охлаждении теплоносителя приближаются к аналогичным данным при нагреве теплоносителя.

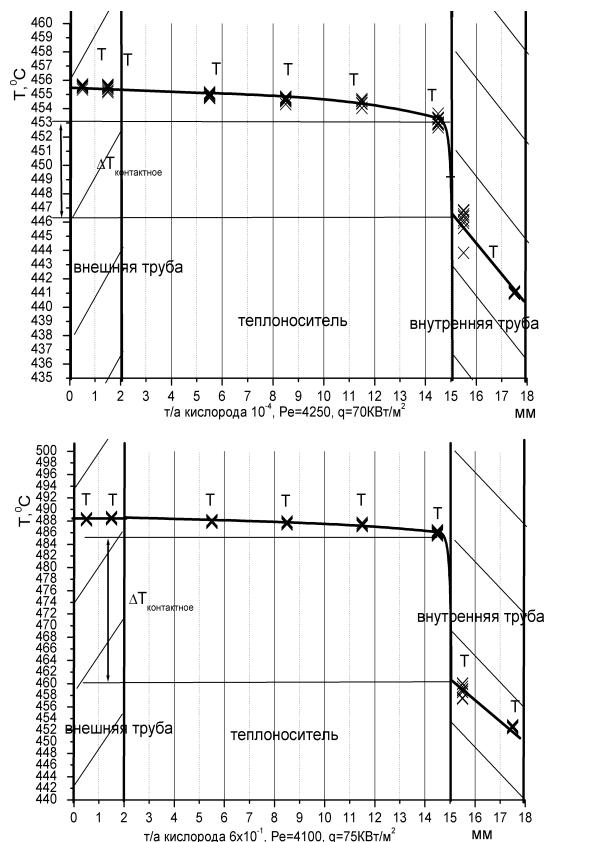


Рис. 5. Экспериментальные зависимости температуры по сечению экспериментального участка

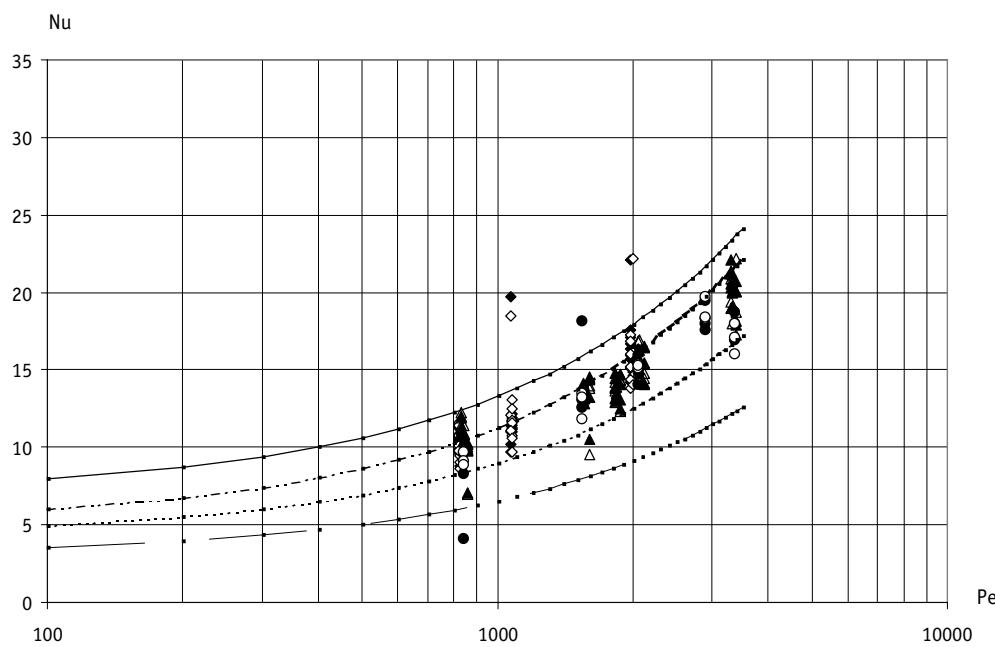


Рис. 6. Локальные характеристики теплообмена. Термодинамическая активность кислорода 10^{-6} - 10^0 (данные Семенова А.В.): _____ $Nu=7+0.025Pe^{0.8}$; $Nu=5+0.025Pe^{0.8}$;
 — $Nu=3+0.014Pe^{0.8}$; $Nu=4,2+0.019Pe^{0.8}$

Можно сделать вывод, что при отсутствии примесей (оксидов металлов) в пристенной области характеристики теплообмена не зависят от направления теплового потока и согласуются с результатами теоретических расчетов. Дозированное введение в контур кислорода последовательно приводит к ухудшению характеристик теплообмена. Подобное различие объясняется тем, что в пристенной области «горячей» стенки отложения примесей могут образовываться в основном за счет массопереноса частиц примесей в разветвленном контуре и массообмена пристенной области с ядром потока. В пристенной области «холодной» стенки образование отложений может происходить также и вследствие кристаллизации примесей из теплоносителя в наиболее холодной зоне контура. При условии теплоотвода от ТЖМТ к стенке, влияние марки стали поверхности теплообмена, вероятно, имеет существенно меньшее значение, чем при направлении теплового потока от стенки к ТЖМТ.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования подтверждают существенную зависимость характеристик теплообмена ТЖМТ от наличия, содержания и состояния примесей в пристенной области.

Экспериментально подтверждена корреляция между показаниями датчика контроля термодинамической активности кислорода в ТЖМТ и характеристиками теплообмена при различных режимах эксплуатации контура.

Подтверждена и объяснена зависимость характеристик теплообмена между ТЖМТ и теплопередающей поверхностью от направления теплового потока.

Экспериментальные и расчетно-теоретические исследования характеристик теплообмена натурных ТЖМТ в условиях режимных характеристик энергетических контуров при обтекании одиночных стержней и труб, проводимые в НГТУ, имеют практическое значение.

Литература

1. Семенов А.В. Теплообмен свинцового теплоносителя в круглой трубе и кольцевой щели при условии регулирования и контроля его примесей/Диссертация на соискание степени к.т.н. – Н. Новгород: НГТУ, 2003.

Поступила в редакцию 7.04.2006

УДК 621.039.54

Calculation of the Decay Power in Used Fuel and Radioactive Waste Products | O.B. Duginov; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obrinsk, 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 vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obrinsk, 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 35-80KWT/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 vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obrinsk, 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

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

State Institution Medical Radiological Research Center RAMS, Obrinsk, 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.