

# ТЕПЛООТДАЧА К СВИНЦОВОМУ ТЕПЛОНОСИТЕЛЮ В КОЛЬЦЕВОЙ ЩЕЛИ ПРИ КОНТРОЛИРУЕМОМ СОДЕРЖАНИИ КИСЛОРОДА

**А.В. Безносков\*, А.В. Семенов\*, С.С. Пинаев\*, А.Д. Ефанов\*\*,  
Ю.И. Орлов\*\*, А.В. Жуков\*\***

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

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



Приводятся результаты экспериментальных исследований теплоотдачи к свинцовому теплоносителю в кольцевом зазоре в условиях регулирования и контроля содержания кислорода. Исследования проводили в диапазоне чисел  $Re = 260 - 1000$ ,  $Re = 10000 - 42000$ , в диапазоне удельного теплового потока  $\sim 25 - 40$  кВт/м<sup>2</sup>, содержание термодинамически активного кислорода в свинце поддерживалось в диапазоне  $10^{-7} - 10^0$ .

## ВВЕДЕНИЕ

Концепции применения тяжелых жидкометаллических теплоносителей (Pb, Ga, эвтектик Pb-Bi, Pb-Li): в реакторах деления ядер (Pb, Pb-Bi), в жидкометаллических мишенях и мишенных контурах ускорительно-управляемых систем (Pb-Bi, Ga), в системах теплоотвода бланкетов (Pb, Pb-Bi, Pb-Li) и диверторов (Ga) термоядерных реакторов инициировали работы по уточнению соответствующих расчетных кодов теплообмена, созданных в 50-80 годах прошлого столетия [1]. Современная экспериментальная техника, вычислительная техника, более глубокое понимание физико-химических и теплофизических процессов в системах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) и накопленный опыт эксплуатации таких систем делают возможным уточнение созданных ранее соответствующих расчетных кодов, с учетом специфики каждого теплоносителя, реального исполнения контура, режимов его эксплуатации, контролируемого физико-химического состояния примесей в теплоносителе и контуре. При этом обязательным условием получения качественных результатов применительно к реальным условиям эксплуатации являются исследование следующих взаимосвязанных процессов:

- массообмена и массопереноса примесей, транспортируемых потоком теплоносителя в разветвленном циркуляционном контуре, массообмена между ядром потока и пристенными зонами в его отдельных участках;
- гидродинамики локальных участков контура, определяющей динамику накопления и количество примесей в этих участках;
- теплообмена между поверхностями ядром потока с учетом возможных физико-химических состояний и состава оксидных защитных покрытий и отложений примесей на поверхностях и смеси теплоноситель-примеси в объеме пристенной зоны локального участка контура.

© А.В. Безносков, А.В. Семенов, С.С. Пинаев, А.Д. Ефанов, Ю.И. Орлов, А.В. Жуков, 2004

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В Нижегородском техническом университете спроектирован и создан циркуляционный жидкометаллический стенд и проводятся экспериментальные исследования зависимости теплоотдачи к свинцовому теплоносителю в кольцевой щели в условиях целенаправленного изменения содержания кислорода в теплоносителе и контуре.

Стенд, показанный на рис. 1, представляет собой свинцовый контур с центробежным насосом. Расход контролируется объемным методом – расходомерной емкостью, содержание кислорода в свинце – датчиками термодинамической активности на основе твердого гальванического концентрационного элемента. Оборудование и трубопроводы, контактирующие со свинцовым теплоносителем выполнены из стали 08Х18Н10Т, имеют электрообогрев и теплоизоляцию.

Экспериментальный участок, представленный на рис. 2, содержит электрообогреваемый корпус с патрубками подвода и отвода теплоносителя с размещенными в нем трубчатым электрообогревателем с чехловой трубой и термозондом.

Электрообогреваемый корпус выполнен в центральной цилиндрической части из трубы 75×5 мм из стали 12Х18Н10Т с пазами в трех сечениях ( $l/d = 8; 19; 30$ ) для размещения термопар на внутренней поверхности трубы (заделанных в стенку на глубину 4,6 мм) – по две диаметрально противоположных; эти пазы имеют во внешней части ширину 2,0 мм и в месте укладки термопары – 0,6 мм. В каждом сечении под углом 30° к «глубоким» пазам выфрезерованы пазы для укладки термопар на

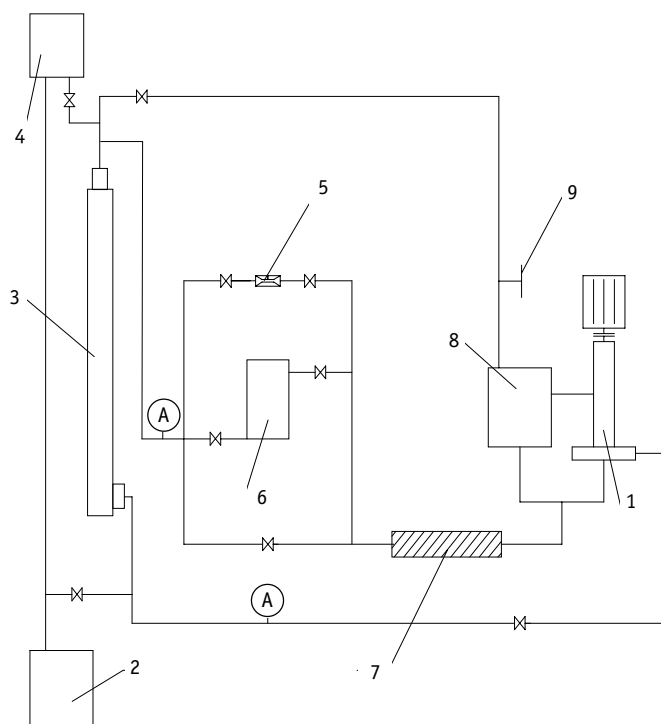


Рис.1 Принципиальная схема экспериментального стенда: 1 – центробежный насос; 2 – емкость дренажная; 3 – экспериментальный участок; 4 – фильтр механический; 5 – эжектор ввода газовых смесей; 6 – расходомерная емкость; 7 – холодильник воздушный; 8 – емкость буферная (расширительный бак); 9 – контур ввода газовых смесей; (A) – датчик  $t/a O_2$

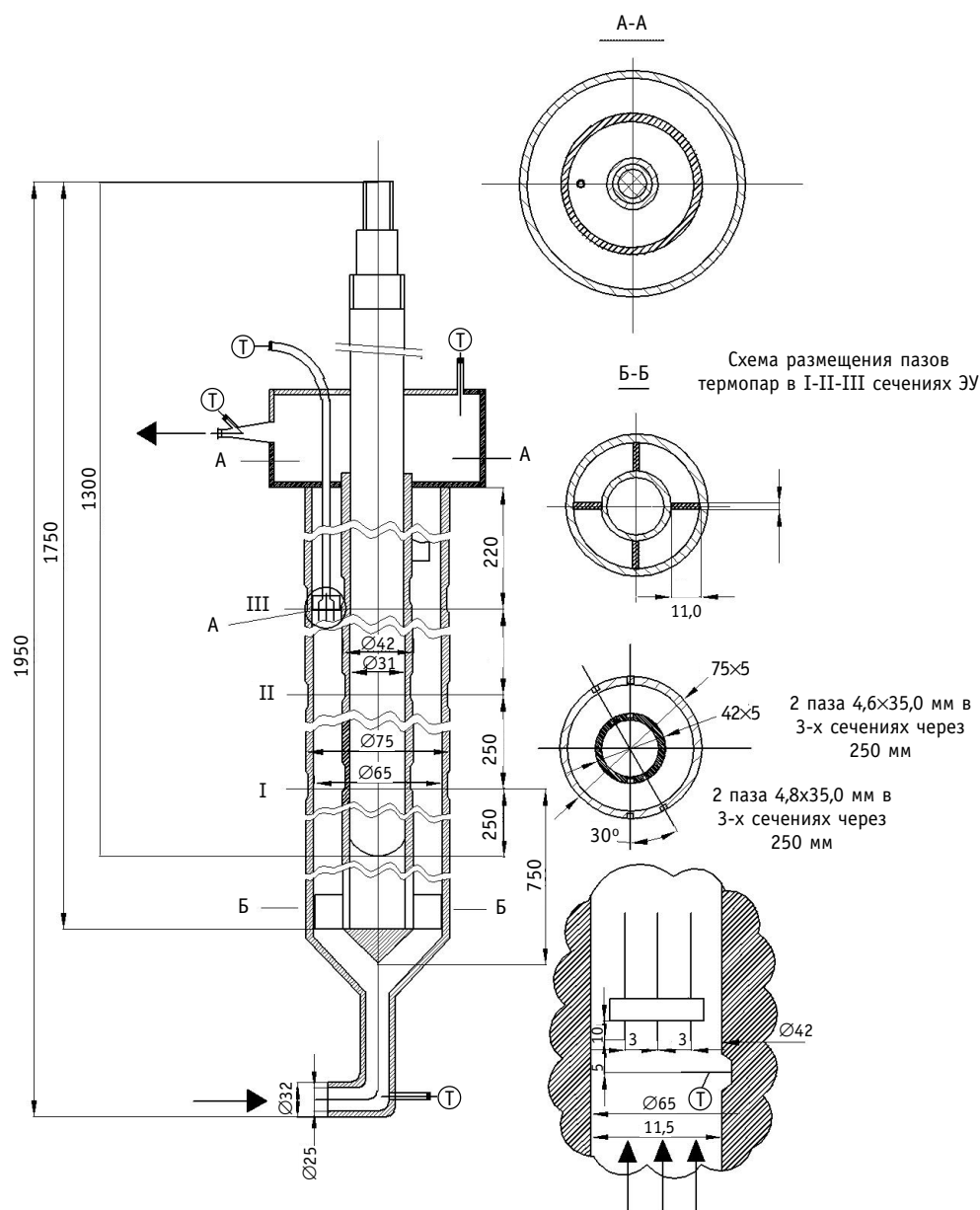


Рис. 2. Схема экспериментального участка: 1 – корпус; 2 – труба чехловая; 3 – трубчатый электрообогреватель; 4 – трубка вывода микротермопар; 5 – обтекатель; 6 – дистанционирующие ребра

поверхности трубы глубиной 0,6 мм, шириной 0,6 мм. К нижней части центральной трубы корпуса приварен конический переходник с  $\text{Ø}65$  мм на  $\text{Ø}25$  мм, к которому приварен гиб из трубы  $32,0 \times 3,5$  с чехлом для установки входной термопары – из стали 12X18H10T.

К верхней части центральной трубы приварена выходная кольцевая камера с коническим патрубком отвода ( $\text{Ø}32 \times 5$ ) и с узлами крепления выходных участков.

В корпусе коаксиально установлен трубчатый электронагреватель наружным диаметром  $\text{Ø}31,0$  мм, размещенный внутри чехловой трубы  $\text{Ø}42,0 \times 5,0$  мм из стали 12X18H10T, которая центрируется в верхней и нижней частях корпуса четырьмя дис-

танционирующими ребрами. К нижней части чехловой трубы приварен конический обтекатель из стали 12Х18Н10Т. Тепло к поверхности наружной трубы подводится с помощью многосекционных электронагревателей, из нихромовой проволоки диаметром 1,8 и 1,6 мм, помещенной в керамические бусы.

Основная секция электронагревателя плотно навита на наружную поверхность трубы в два слоя. Компенсирующая секция, навитая поверх основной, компенсирует тепловые потери. Тепловые потери концевых участков трубы компенсируются посредством автономно управляемых секций.

Для измерения температуры поверхностей корпуса и чехловой трубы в трех сечениях по высоте установлены 24 хромель-алюмелевых микротермопар ТМПК-ХА, в термозонде установлены 3 хромель-алюмелевые микротермопары ТМПК-ХА, на входе и выходе установлено по одной хромель-алюмелевой термопаре ТМПК диаметром капилляра 3,0 мм. Каждая микротермопара имела индивидуальную градуировочную характеристику (погрешность градуировки –  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ). Для уменьшения показателя тепловой инерции термопреобразователей хромель-алюмелевый спай выполнен на поверхности капилляра из аустенитной стали, а чувствительная часть датчика прокатана до диаметра 0,5 мм.

Чувствительные элементы термопар термозонда были установлены в зазоре для прохода теплоносителя на 5,0 мм выше верхнего сечения (сечения III – III,  $l/d=31$ ).

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Программа испытаний включала в себя следующие этапы:

- отработка методик формирования и удаления отложений примеси оксидов свинца со стенок контура при односторонних и двухстороннем подводе тепла к свинцу, текущему в кольцевом зазоре;
- экспериментальное определение зависимости  $Nu = f(Pe)$  при содержании  $t/a$  кислорода в свинце  $a_{O_2}$  от  $10^{-6} \div 10^{-7}$  до  $10^0$ , а также формировании слоя отложений на теплопередающих поверхностях экспериментального участка, построение графических зависимостей при различном содержании кислорода в контуре, а также от времени работы циркуляционного контура при односторонних и двухстороннем подводе тепла;
- ревизия состояния стенда и экспериментального участка.

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. С помощью преобразователя частоты устанавливали расход теплоносителя через экспериментальный участок, включали: ТЭН в ходе первой серии исследований; основной и компенсационный нагрев спиралями в ходе второй серии; одновременная работа ТЭНа, основной и компенсационный нагрев спиралями в ходе третьей серии исследований. Затем вводили в работу воздушный холодильник, устанавливали режим тепловой стабилизации, который определялся неизменностью показаний термопар на входе и выходе экспериментального участка.

В газовый объем контура или поток циркулирующего теплоносителя поэтапно вводили газообразный кислород или водород с соответствующей выдержкой, фиксировали число оборотов циркуляционного насоса (соответственно определяли скорость свинца через экспериментальный участок), ЭДС ГКЭ (соответственно содержание кислорода в свинце и контуре). Измерение термоэдс термопар и первичную обработку результатов производили с использованием автоматизированной системы исследований.

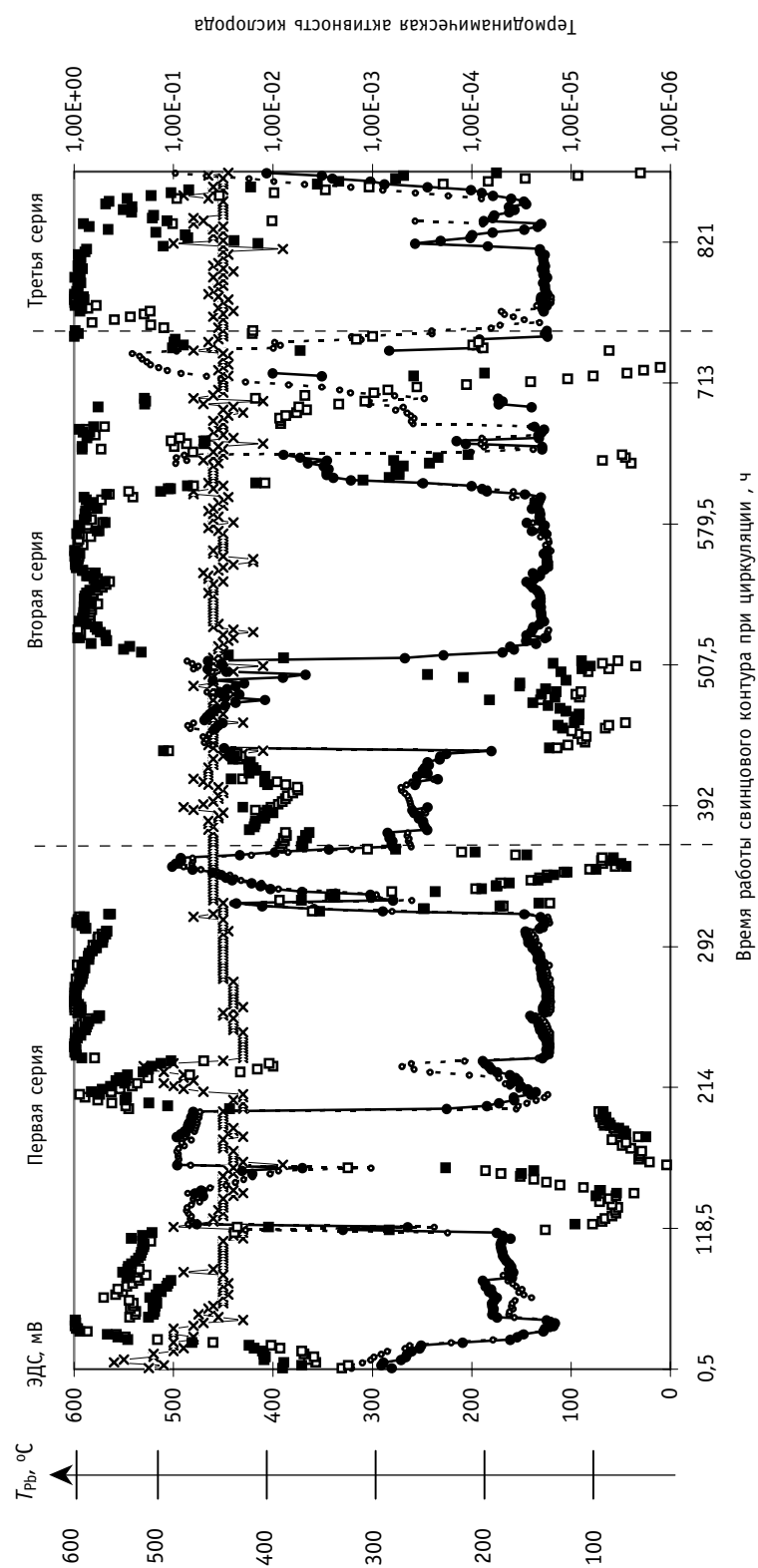


Рис. 3. Изменение основных параметров в процессе экспериментов: X температура свинца,  $^\circ\text{C}$ ; O показания ГКЗ на напорной трассе, мВ; ● показания ГКЗ на всасывающей трассе, мВ; ■ термодинамическая активность кислорода на напорной трассе; ■ термодинамическая активность кислорода на всасывающей трассе

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОТДАЧИ

Эксперименты проводили поэтапно в течение трех основных серий, которые состояли, в свою очередь, из этапов, направленных на изменение окислительного потенциала кислорода (рис. 3).

В ходе экспериментов длительность около 1000 ч (в среднем 300 ч на серию) при различных режимах эксплуатации были получены данные о локальной теплоотдаче, представленные на рис. 4–7.

Анализ позволяет утверждать, что операции, направленные на увеличение содержания кислорода, вызывали увеличение теплоотдачи (см. рис. 4 а–б). На рис. 5 (а–в) и рис. 6 (а–в), операции, направленные на понижение содержания кислорода в контуре, привели к снижению теплоотдачи.

Толщина отложений на поверхностях теплообмена перенесенной массы дисперсных частиц примесей определяется физико-химическим состоянием и содержанием кислорода в контуре, а также режимом течения свинцового теплоносителя в локальном участке контура.

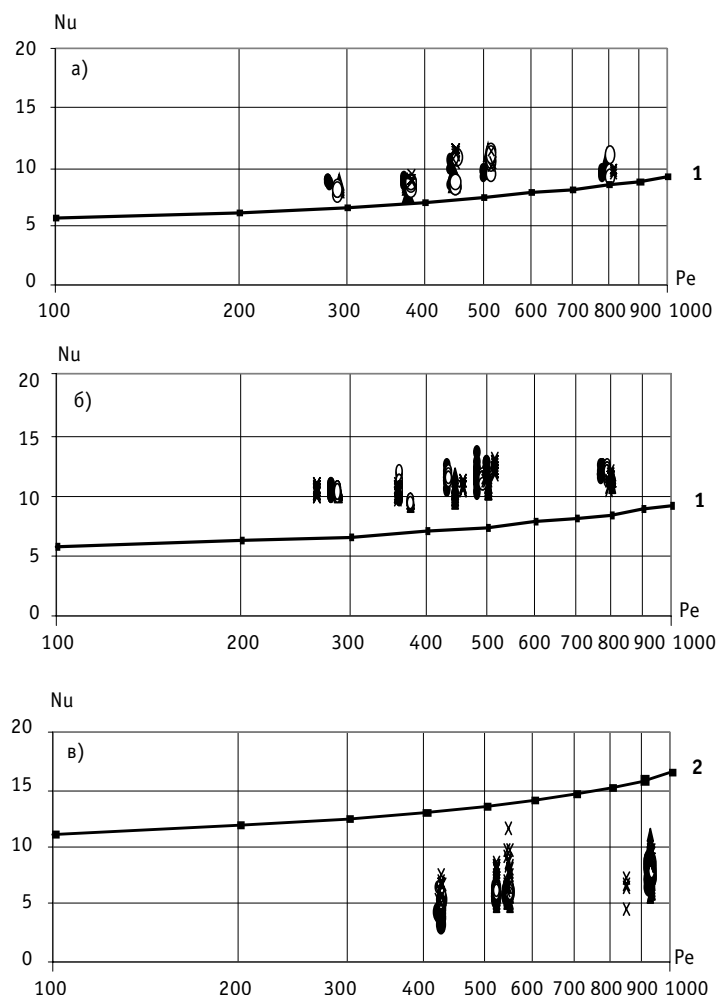


Рис. 4 Зависимость  $Nu=f(Pe)$  после ввода газообразного  $O_2$ : а) при внутреннем подводе тепла (первая серия) для  $l/d = 21,5$ ; б) при наружном подводе тепла (вторая серия) для  $l/d = 19$ ; в) при двухстороннем подводе тепла (третья серия) для  $l/d = 21,5$ ; 1 –  $Nu=(4,3+0,015Pe^{0,8}) \cdot (d_2/d_1)^{0,3}$ ; 2 –  $Nu=10+0,025Pe^{0,8}$

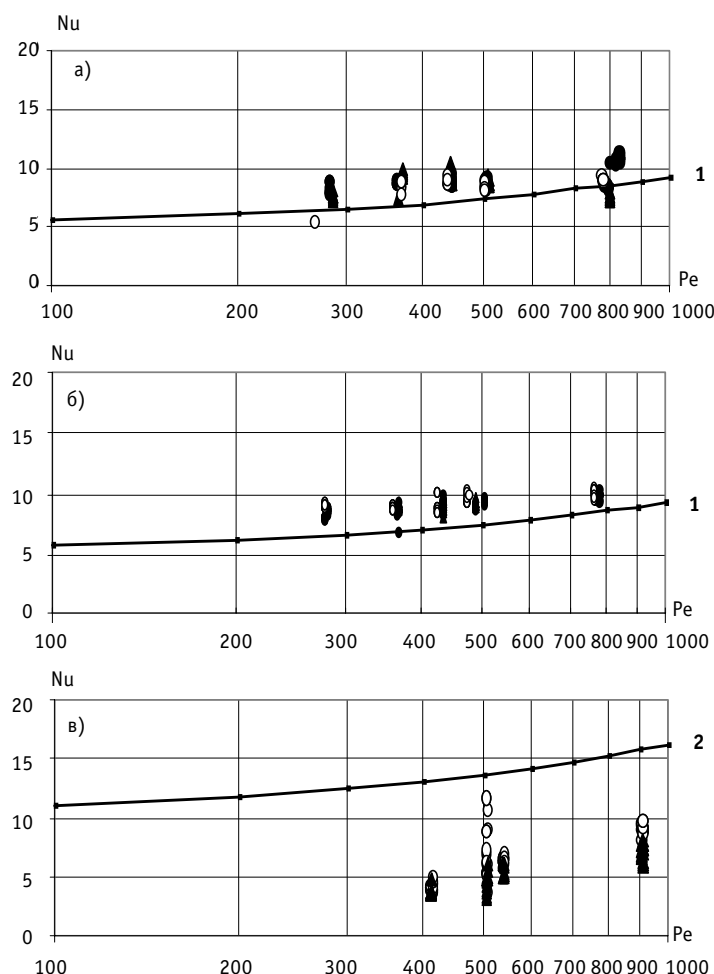


Рис. 5. Зависимость  $Nu=f(Pe)$  после ввода «сухого» водорода: а) при внутреннем подводе тепла (первая серия) для  $l/d = 21,5$ ; б) при наружном подводе тепла (вторая серия) для  $l/d = 19$ ; в) при двухстороннем подводе тепла (третья серия) для  $l/d = 21,5$ ; 1 –  $Nu=(4,3+0,015Pe^{0,8})*(d_2/d_1)^{0,3}$ ; 2 –  $Nu=10+0,025Pe^{0,8}$

Следует отметить, что на результаты экспериментов влияло не только, и не столько количество кислорода, введенного непосредственно перед измерением параметров, сколько предыстория контура и предшествующее время его работы в определенных режимах с вводом и удалением примесей.

В процессе длительной эксплуатации контура в рабочих режимах ( $t_{Pb} \approx 380-600^\circ\text{C}$ ,  $v_{Pb} \approx 0,2$  м/с,  $a_{O_2} = 10^{-6}-10^0$ ) наряду с кислородом в контур поступали примеси – компоненты конструкционных материалов, которые фиксировали при ревизиях стенда с разрезкой трубопроводов контура свинцового теплоносителя.

Кривые (1) и (2) на рис. 4–7 соответствуют расчетным формулам для одностороннего ( $q_w = \text{const}$ ) и двухстороннего обогрева ( $q_{w1} = q_{w2} = \text{const}$ ) при  $1,05 < d_2/d_1 < 2$  и  $5 \cdot 10^2 < Pe < 4 \cdot 10^3$ , полученными сотрудниками ФЭИ [2].

Анализ двухкомпонентной (Pb-Ag и Pb-H<sub>2</sub>) очистки теплопередающих поверхностей контура (см. рис. 7 а, б) показывает, что при односторонних подводах тепла возрастает теплоотдача. При двухстороннем подводе тепла (см. рис. 7 в) наблюдается снижение теплоотдачи. Это можно объяснить осаждением на внутренней поверхности контура, в том числе и экспериментального участка отложений примесей при длительной эксплуатации.

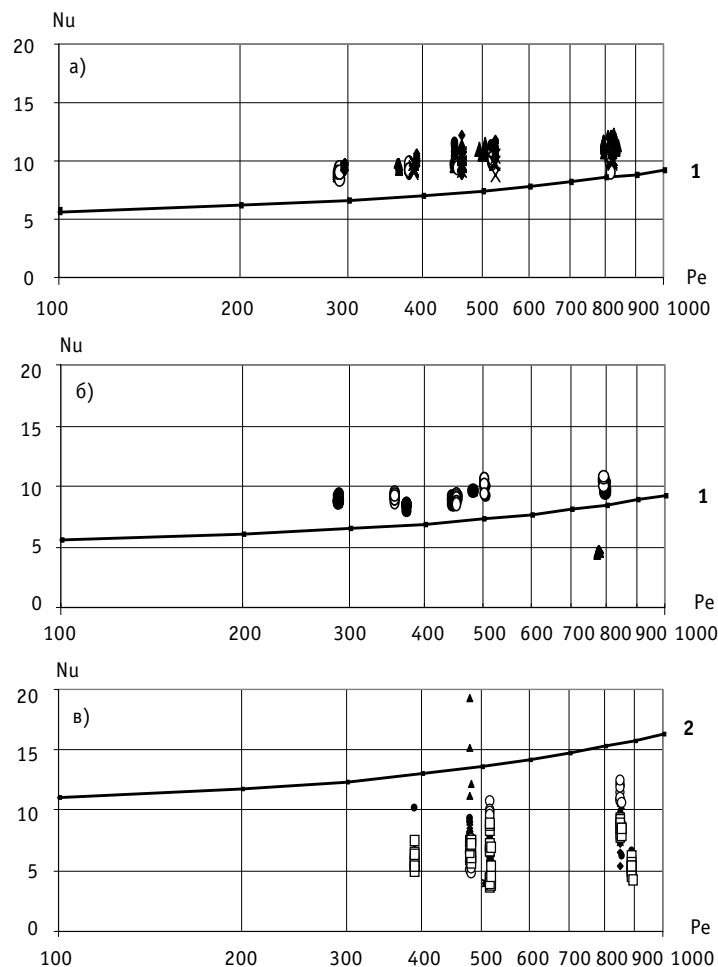


Рис. 6. Зависимость  $Nu=f(Pe)$  после выдержки в Ag: а) при внутреннем подводе тепла (первая серия) для  $l/d = 21,5$ ; б) при наружном подводе тепла (вторая серия) для  $l/d = 19$ ; в) при двухстороннем подводе тепла (третья серия) для  $l/d = 21,5$ ; 1 –  $Nu=(4,3+0.015Pe^{0.8})*(d_2/d_1)^{0.3}$ ; 2 –  $Nu=10+0.025Pe^{0.8}$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования подтвердили зависимость характеристик теплообмена в свинцовом теплоносителе от наличия и толщины отложений примесей на тепlopередающей поверхности аустенитной стали 12X18H10T в случаях односторонних и двухстороннего подвода тепла при течении свинца в кольцевой щели.

Экспериментально подтверждена корреляция между показаниями датчика термодинамической активности кислорода в свинце и характеристиками теплообмена при различных режимах эксплуатации контура в течение около 1000 ч.

Представлена зависимость локальных характеристик теплообмена от количества кислорода и водорода, подаваемых в контур со свинцовым теплоносителем в виде  $Nu = f(Pe)$  для  $Pe = 260-1000$  и  $Re = 10000-42000$  при температурах свинца 380–600°C для термодинамической активности кислорода от  $10^0$  до  $10^{-6}$ , что соответствует возможным условиям РУ БРЕСТ-ОД-300 при нормальной эксплуатации и при аварийных ситуациях.



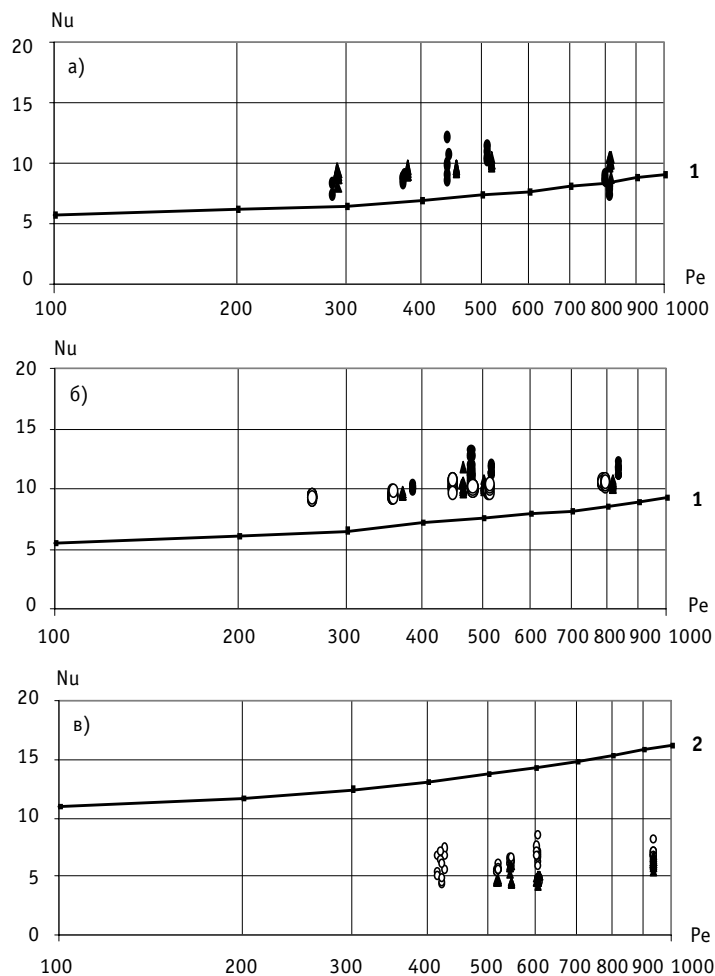


Рис. 7. Зависимость  $Nu=f(Pe)$  после 2-компонентных потоков (Pb-Ar и Pb-H<sub>2</sub>): а) при внутреннем подводе тепла (первая серия) для  $l/d = 21,5$ ; б) при наружном подводе тепла (вторая серия) для  $l/d = 19$ ; в) при двухстороннем подводе тепла (третья серия) для  $l/d = 21,5$ ; 1 –  $Nu=(4,3+0,015Pe^{0,8})*(d_2/d_1)^{0,3}$ ; 2 –  $Nu=10+0,025Pe^{0,8}$

### Литература

1. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П., Сила-Новицкий А.Г., Смирнов В.П. Проблемы теплогидравлики в активной зоне реакторов с естественной безопасностью типа БРЕСТ (свинцовое охлаждение)/ Тез. докл. отраслевого научно-технического семинара «Проблемы технологии и теплогидравлики жидкометаллических теплоносителей» (30-3 ноября 2000). – С. 30-34.
2. Субботин В.И., Арнольдов М.Н., Ивановский М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. – М.: Атомиздат, 1970.

Поступила в редакцию 9.07.2004

substrates differ in 3 – 4 times. The quantities of power of adhesion make 88 – 104 mJ/m<sup>2</sup>, the quantities of cohesion lie in an interval from 64 up to 86 mJ/m<sup>2</sup>. Ability to adsorb contaminations for all latex films is approximately identical. The prospects of application of this type of latexes are estimated as deactivating coats for NPP.

#### **УДК 621.039.51**

*Transport Evaluated Files to Study Particle Transport in Materials Irradiated by Neutrons with Energies up to 150 MeV* \ A.Yu. Konobeyev, Yu.A. Korovin, G.B. Pilnov, A.Yu. Stankovskiy, A.A. Andrianov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 7 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 35 titles.

A new evaluated neutron nuclear data library «Transport Evaluated Files, TREF» to study neutron transport in materials irradiated by neutrons have been elaborated. The files constituting the library contain nuclear data for neutronics calculations for 242 nuclides ranging with atomic number from 8 to 82 in the energy region of primary neutrons from 10<sup>-5</sup> eV to 150 MeV. Below 20 MeV data are taken mainly from ENDF/B-VI (Revision 8) and for some nuclides – from JENDL-3.3 and JEFF-3.0 libraries. The evaluation of emitted particle energy and angular distributions at the energies above 20 MeV was performed with the help of the ALICE/ASH code and the analysis of available experimental data. The results of calculation were adjusted to the data from ENDF/B-VI, JENDL-3.3 or JEFF-3.0 at the neutron energy equal to 20 MeV. The files are written in ENDF-6 format.

#### **УДК 621.039.54**

*The Method of Calculation of Radiation Conditions around the Shipping Casks with SNF* \ V.A. Opalovsky, G.V. Tikhomirov, E.F. Kryuchkov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 7 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 10 titles.

The exploitation of nuclear reactors result in constitution of spent nuclear fuel (SNF). It is necessary to know radiation characteristics of SNF independently of the scenario of management with SNF. There are examination of radiation characteristics on the phases of storage and transportation in shipping casks presented in this article. The characteristic property of this article is the calculate of SNF characteristics by the combined using of SCALE and MCNP programs. The complex SCALE is using for calculations of radiation source. The MCNP program is using for calculations of transfer of radiation.

#### **УДК 621.039.526: 621.039.546.8**

*Hydraulic Test Facility for Testing of Model Nuclear Reactor* \ E.F. Avdeev, I.A. Chusov, A.Ya. Ustujanin, V.V. Maksimovskiy, D.S. Lazikyan, V.A. Levchenko, S.V. Borodastov, I.N. Leonov, V.A. Belugin, Yu.D. Levchenko, Yu.S. Yur'ev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 14 pages, 3 tables, 8 illustrations. – References, 8 titles.

Describing of the main design and hydraulic characteristics of the «MR» test facility created in the «Thermophysics» department is presented in this paper. Equipment, circulating loop of the coolant, hydraulic two-loop reactor model and measuring systems are also described. Scientific and education purposes of this test facility are presented.

#### **УДК 621.039.542: 536.24**

*Heat Exchange to Lead Coolant in the Annual Gap at Controller Oxygen Content* \ A.V. Beznosov, A.V. Semyonov, S.S. Pinaev, A.D. Efanov, Yu.I. Orlov, A.V. Zhukov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Shools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 9 pages, 7 illustratins. – Reference, 2 titles

Results of experimental investigations of a convective heat exchange are resulted in leads heat-transfer agent in an annular gap in conditions of regulating and the surveillance of oxygen content.

Probes carried out over the range figures  $Pe = 260 - 1000$ ,  $Re = 10000 - 42000$ , over the range a specific heat flow of  $\sim 25-40 \text{ kW/m}^2$ , the contents thermodynamical active oxygen in lead was bolstered over the range  $10^{-7} - 10^0$ .

**УДК 621.039.534: 519.7**

*Mathematical Modulation of Transmitting Processes in Complex Associated Heat Transfer Systems at Natural Circulation of Heat Carrier* \ S.A. Samiatin, A.N. Semenenko; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 7 pages, 3 illustrations. – References, 2 titles.

The mathematical model describing thermohydraulic processes taking place in the system of emergency getting cooled of NTS is given here. The temporary analysis of transfer states connected with putting into operating of the cooling emergency system was carried out using total external cutting electricity off the station while working at the nominal rate. Here is the conclusion about the workability of the emergency cooling system in the reactor unit at the Gorky Atomic Thermal Station.