

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА И ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР ПОТОКА ТЯЖЕЛОГО ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

А.В.Безносков, О.О.Новожилова, С.Ю.Савинов

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород*



Представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена к свинцовому теплоносителю в кольцевом зазоре в циркуляционном контуре при контролируемых и управляемых процессах массообмена и массопереноса примеси кислорода. Исследования проведены в неизотермическом контуре (в данной статье представлены результаты экспериментов, полученных на теплоподводящем экспериментальном участке, имитирующем условия теплообмена от твэла в активной зоне) с циркулирующей свинцовой теплоносителем при температуре 450–550°C, средней скорости теплоносителя 0,1–1,5 м/с, числе Пекле 500–6000 и среднем тепловом потоке 50–160 кВт/м². Содержание кислорода в различных точках контура поддерживалось в диапазоне термодинамической активности кислорода 10⁻⁵–10⁰. Процессы в неизотермическом жидкометаллическом контуре с нагревательным экспериментальным участком моделируют зависимость характеристик теплообмена в контуре от характеристик массопереноса примесей.

ВВЕДЕНИЕ

Жидкие металлы являются привлекательными высокотемпературными теплоносителями для ядерной энергетики в связи с их физическими характеристиками: низкие давления, высокие коэффициенты теплообмена, а, следовательно, небольшие разности температуры между поверхностью твэла и теплоносителем при высоких плотностях теплового потока. Современная экспериментальная и вычислительная техника, новые подходы к решению задач теплообмена, накопленный опыт эксплуатации жидкометаллических систем делают возможным исследования влияния эксплуатационного содержания примесей, проведения технологических процессов очистки контура, аварийных процессов поступления примесей одновременно как на характеристики теплообмена в «горячих», так и в «холодных» зонах контура. При этом обязательным условием получения качественных результатов применительно к реальным условиям эксплуатации жидкометаллических систем являются исследования таких взаимосвязанных процессов как массообмен

© А.В.Безносков, О.О.Новожилова, С.Ю.Савинов, 2008

и массоперенос примесей, транспортируемых потоком теплоносителя, теплообмен между поверхностями и ядром потока одновременно и в неизотермическом контуре.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В Нижегородском государственном техническом университете им Р.Е. Алексеева (НГТУ) создан экспериментальный стенд и проведены исследования характеристик теплообмена и профилей температур в потоке жидкометаллического теплоносителя при контроле и регулировании содержания примеси кислорода в теплоносителе. Ранее в НГТУ проводились исследования характеристик теплообмена в свинцовом и свинец-висмутовом теплоносителях отдельно для условий нагрева и охлаждения теплоносителя [1, 2]. Настоящие испытания [3] отличаются от предыдущих тем, что при контролируемом и управляемом изменении состояния и состава примесей в теплоносителе и в контуре измерения характеристик теплообмена в участках нагрева и охлаждения производились одновременно.

Экспериментальный стенд (рис. 1) представляет собой свинцовый и свинец-висмутовый контура с центробежными насосами. Циркуляционные контура свинцового и свинец-висмутового теплоносителей объединялись «холодным» экспериментальным участком. Такое техническое решение позволило провести исследования локальных характеристик теплообмена при существенно более низких давлениях в стенде, чем при использовании воды в контуре охлаждения.

Оба контура были снабжены системой дозированного ввода газообразного кислорода, магнитными расходомерами с емкостями их тарировки, устройствами измерения электрических характеристик защитных покрытий и отложений примесей, датчиками контроля термодинамической активности кислорода в ТЖМТ на основе твердого гальванического концентрационного элемента поставки ГНЦ РФ-ФЭИ. В свинец-висмутовом контуре был установлен один датчик активности кислорода; в свинцовом контуре – два датчика активности кислорода: в емкости измерения удельного электросопротивления оксидных покрытий и на выходе из экспериментального участка. Оборудование и трубопроводы, контактирующие со свинцовым теплоносителем, выполнены из стали 08Х18Н10Т, имеют электрообогрев и теплоизоляцию.

Нагревательный экспериментальный участок (рис. 2) выполнен в виде вертикальных коаксиально расположенных труб ($d_2/d_1=4.2$). Внешняя труба $\varnothing 45 \times 2,5$ мм изготовлена из аустенитной стали 12Х18Н10Т длиной 1570 мм. Внутренняя труба представляет собой специально созданный в НГТУ трубчатый электронагреватель со штатной оболочкой твэла проектируемой реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 из ферритно-мартенситной стали 16Х12МВCFБАР-Ш диаметром $\varnothing 9 \times 0,25$, длиной 2100 и активной частью 1600 мм. На высоте 1250 мм от входа в нагревательный экспериментальный участок в кольцевом зазоре установлен термозонд для измерения профиля температуры потока свинцового теплоносителя.

Для измерения температур наружной и внутренней поверхностей экспериментального участка были выполнены сечения по высоте, в которых устанавливались хромель-алюмелевые микротермопары в капилляре из аустенитной стали с индивидуальной градуировочной характеристикой (погрешность градуировки $\pm 0,2^\circ\text{C}$).

Подвод тепла к поверхности внешней трубы экспериментального участка осуществляется с помощью многосекционных электронагревателей, выполненных из нихромовой проволоки диаметром 1,0 и 1,6 мм, помещенной в керамические бусы. Основная секция электронагревателя плотно навивается на наружные поверхности труб в два слоя. Компенсирующая секция навивается поверх первой и служит

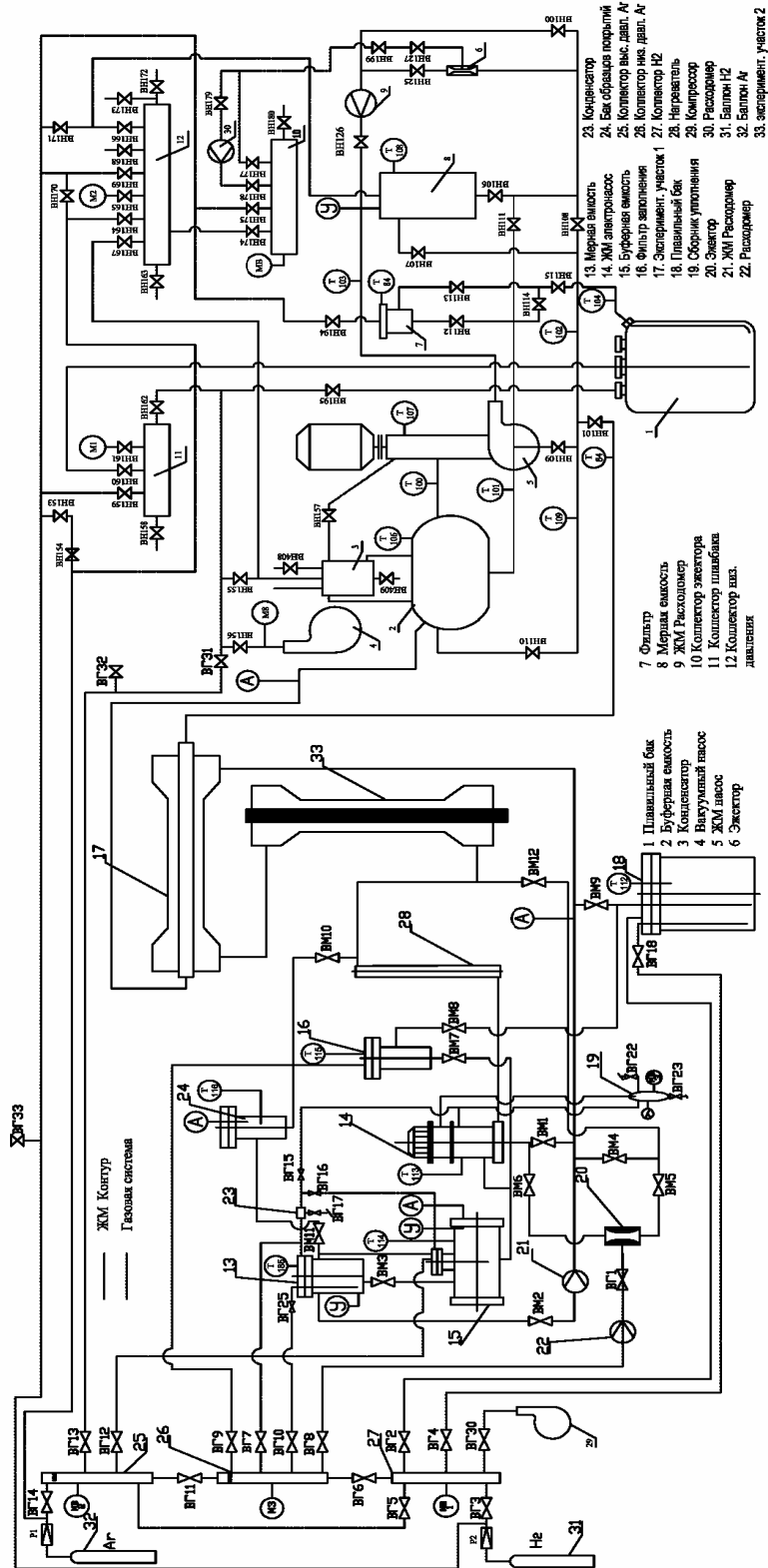


Рис. 1. Схема объединенного экспериментального стенда

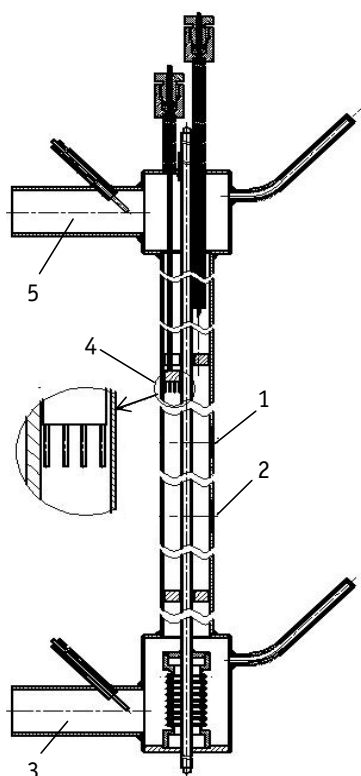


Рис.2. Экспериментальный участок с электронагревателем и оболочкой твэла: 1, 2 — верхнее и нижнее сечение соответственно; 3, 5 — патрубок подвода и отвода свинцового теплоносителя; 4 — термозонд

для компенсации тепловых потерь. Для компенсации тепловых потерь от концевых участков труб служат автономно управляемые секции. Уровень мощности компенсирующих электронагревателей регулируется в зависимости от тепловых потерь, определяемых по разности температур, измеряемых микротермопарами, расположенными между слоями основного и компенсирующих электронагревателей. Данные с первичных приборов, установленных на экспериментальных участках, а также с датчиков активности кислорода и магнитных расходомеров обрабатываются компьютеризированной системой. Программное обеспечение позволяет: получать и обрабатывать данные с разрешением по времени до 0,3 с, рассчитывать теплофизические константы материалов и производить расчет чисел Nu и Pe , отображать в реальном времени измеряемые параметры и результаты расчета, сохранять данные.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Программа испытаний включала в себя следующие этапы:

- обработка методики контроля и управления содержанием кислорода в теплоносителе и формирования отложений примеси оксидов свинца на стенках контура и теплоотводящего экспериментального участка;
- экспериментальное одновременное определение

зависимости $Nu=f(Pe)$ и контактного термического сопротивления на теплоподводящих и теплоотводящих поверхностях теплообмена при значениях термодинамически активного кислорода в свинце от $10^{-5}...10^{-4}$ до 10^0 , а также при формировании слоя отложений примесей на поверхностях теплоотводящего экспериментального участка;

- построение графических и аналитических зависимостей $Nu=f(Pe)$ и $Nu=f(\text{время})$ при различном содержании примеси кислорода в теплоносителе и в контуре для условий, подводящих и отводящих тепло участков;

- ревизия состояния стенда и экспериментальных участков.

На протяжении всех этапов эксперимента стенд находился в неизотермическом режиме.

В процессе серии исследований определялись зависимости характеристик теплообмена на участках подвода и отвода тепла в следующих повторяющихся режимах:

- с раскислением свинцового теплоносителя за счет подачи «сухого» водорода и с последующей выдержкой в системе газа избыточного давления аргона;
- с окислением свинцового теплоносителя за счет периодической подачи газообразного кислорода с последующей выдержкой в системе газа избыточного давления аргона;

- саморегулирование контура в атмосфере инертного газа;
- очистка двухфазными смесями теплоноситель-газ (водород, аргон, гелий).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основные подэтапы проведенных серий экспериментальных исследований и временная зависимость термодинамической активности кислорода в свинце представлены на рис. 3. На протяжении всех этапов эксперимента стенд находился в неизотермическом режиме. ЭУ – охладитель (поз. 17 рис. 1) являлся холодным участком, а ЭУ – нагреватель (поз. 33 рис. 1) являлся горячим участком неизотермического стенда.

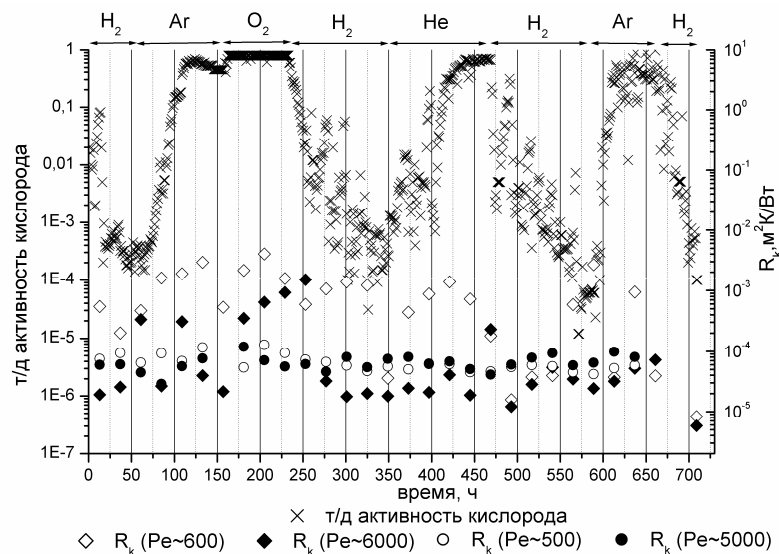


Рис. 3. Сводный график испытаний

В процессе исследований характеристик теплообмена на неизотермическом стенде было установлено, что присутствует существенная разница во влиянии содержания примеси кислорода в свинце на характеристики теплообмена на «горячих» и «холодных» поверхностях.

Анализ показывает, что введение кислорода в контур последовательно ухудшало характеристики теплообмена на охлаждаемых поверхностях теплоотводящего экспериментального участка, имитирующего условия теплообмена в парогенераторе, в то время как практически не оказывало влияния на теплообмен в «горячем» экспериментальном участке – имитаторе условий активной зоны. При вводе кислорода в контур на нагревательном участке характеристики теплообмена были близки к теоретическим расчетным данным для чистых жидких металлов и условий смачивания поверхности теплоносителем. На участке отвода тепла зафиксированы значительно худшие характеристики теплообмена. При вводе кислорода и постоянном охлаждении свинца в теплоотводящем участке в пристенной области холодной стенки, начиная с определенного содержания кислорода в теплоносителе, образуются отложения, определяемые по ухудшению характеристик теплообмена [4].

Так, для «горячей» поверхности данные зависимости можно представить следующим образом: $Nu=7+0,018Pe^{0,8}$, ($500 < Pe < 5000$) для режимов с введением значительного количества кислорода и в диапазоне высокой термодинамической активности кислорода ($10^{-1} \dots 10^0$) и термодинамической активности кислорода

($10^{-4} \dots 10^{-1}$). В диапазоне термодинамической активности кислорода ($10^{-4} \dots 10^{-5}$) параметры теплообмена можно представить зависимостью $Nu = 5,6 + 0,018Pe^{0,8}$, ($500 < Pe < 5000$).

На теплоотводящем экспериментальном участке были получены следующие значения: характеристики теплообмена с введением значительного количества кислорода и образованием отложений оксидов свинца стремятся к асимптоте, описываемой зависимостью $Nu = 2$ при $600 < Pe < 6000$. В диапазоне термодинамической активности кислорода ($10^{-4} \dots 10^{-1}$) характеристики теплообмена можно представить следующей зависимостью $Nu = 2 + 0,015Pe^{0,8}$ ($600 < Pe < 6000$) и в диапазоне ($10^{-4} \dots 10^{-5}$) – $Nu = 2 + 0,012Pe^{0,8}$.

По результатам исследования профилей температур в потоке свинца в каналах неизотермического контура с регулированием и контролем содержания примесей было установлено что вблизи «горячей» стенки профиль температур в размерных и безразмерных координатах – линейный. На рис. 4 представлены размерные зависимости температуры от координаты в сечении потока теплоносителя при варьируемых значениях числа Пекле и теплового потока и различном содержании примеси кислорода в теплоносителе.

При оформлении графиков размерных профилей температур за контактный перепад температур (ΔT_k) принята разница между расчетной температурой поверхности стенки (по термопаре заделанной в стенку, T_2) и температурой потока, определяемой по крайней термопаре термозонда (T_{17} , расстояние до стенки 1 мм). По мнению авторов, при соотношении $d_2/d_1 = 4,2$ тепловой пограничный слой охватывает большую часть зазора (~ 10 мм) и микротермопара термозонда диаметром спая 1 мм, находившаяся на расстоянии от стенки 1 мм с погрешностью установки 0,1 мм показывает (что и продемонстрировали испытания) более «горячую» температуру теплоносителя, т.е. не «теплоизолирована» от потока отложениями [5].

Результаты экспериментов (рис. 5) А.В. Семенова [6] по теплоотводу в кольцевом зазоре от электрообогреваемой трубы из стали 10Х9НМФБ ($d_2/d_1 = 1,5$), проведенные ранее, показывают аналогичные результаты.

Разница («скачок») температуры в пристенной области между рассчитанной температурой стенки и измеренной в потоке ТЖМТ температурой на расстоянии 1 мм от стенки составляло 3 и 4°C при наличии в газовой системе аргона и водорода, и 8°C при вводе кислорода при $Pe = 600-750$. При $Pe = 4525-4575$ эта разница составила 11°C при аргоне в системе газа и 6°C – при водороде соответственно. При вводе кислорода в контур (в систему газа, заполненную аргоном) эта величина составила 8°C. При этом в диапазоне чисел Pe 590 – 4750, не зависимо от величины Пекле суммарный перепад температур между рассчитанной температурой стенки и измеренной температурой в потоке ТЖМТ вблизи другой стенки, во всех случаях (см. рис. 4–6) составил около 10°C. Большей величине скачка температуры в пристенной «горячей» области соответствует меньший перепад температур в поперечном сечении потока и, наоборот, меньшей величине «скачка» температуры вблизи «горячей» стенки – больший перепад температур в поперечном сечении потока. Оказалось (что не очень понятно), что разность температур между рассчитанной температурой «горячей» стенки в зазоре и температурой в потоке вблизи «холодной» стенки не зависит не только от величины числа Пекле, но и от содержания примеси кислорода в ТЖМТ и от величины теплового потока в диапазоне 65–123 кВт/м². При больших скачках температур в пристенной «горячей» области профиль в потоке уплощается. При увеличении числа Пекле профиль температуры в потоке уплощается больше, что свидетельствует о возрастающем зна-

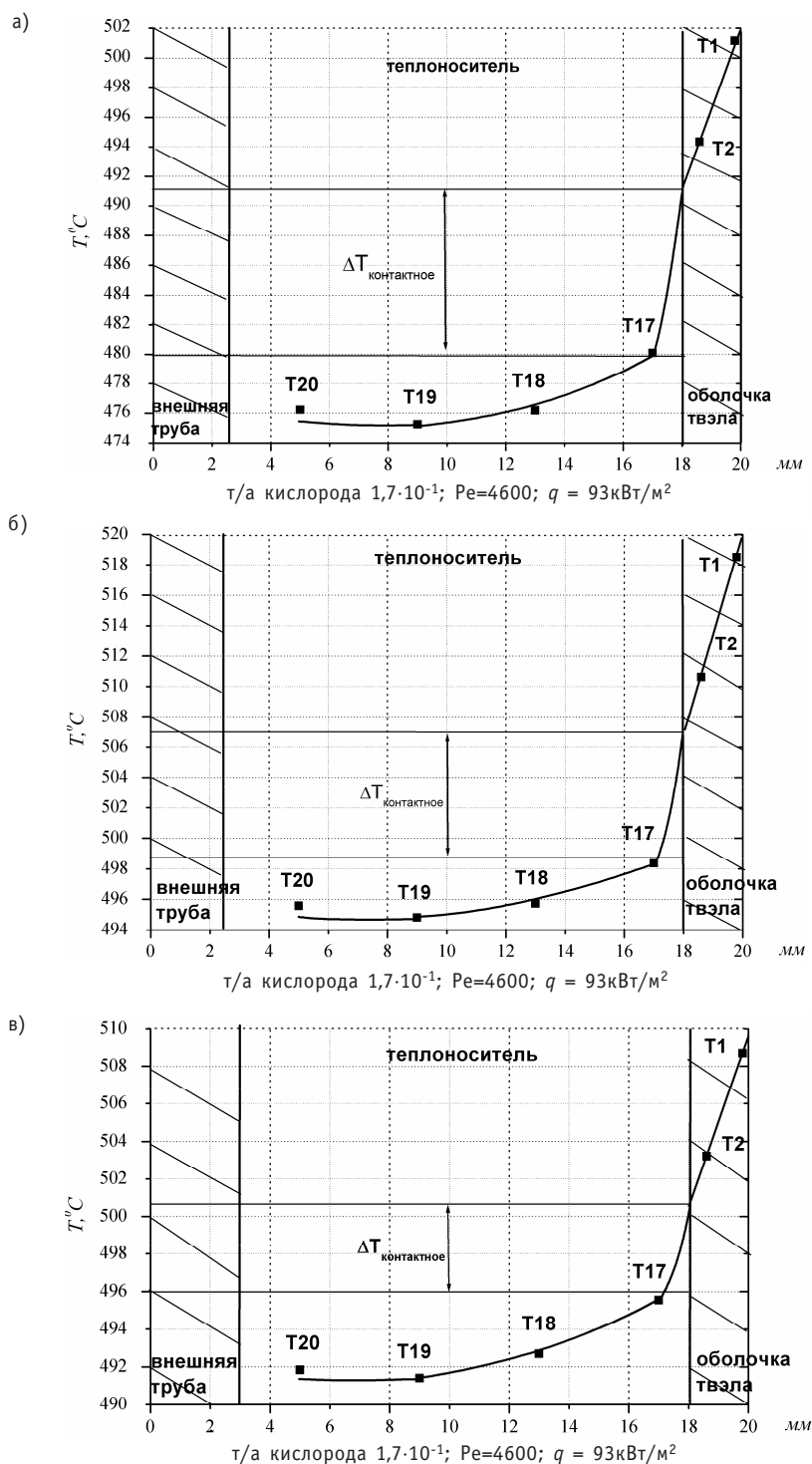


Рис. 4. Локальный профиль температур в кольцевом зазоре от электрообогреваемой трубы из стали 16Х12МВСФБАР-Ш при различном содержании примеси кислорода в контуре: а) – 157 ч работы стенда (саморегулирование Ar); б) – 229 ч работы стенда (обработка O_2 – подано 30 г кислорода); в) – 349 ч работы стенда (обработка H_2)

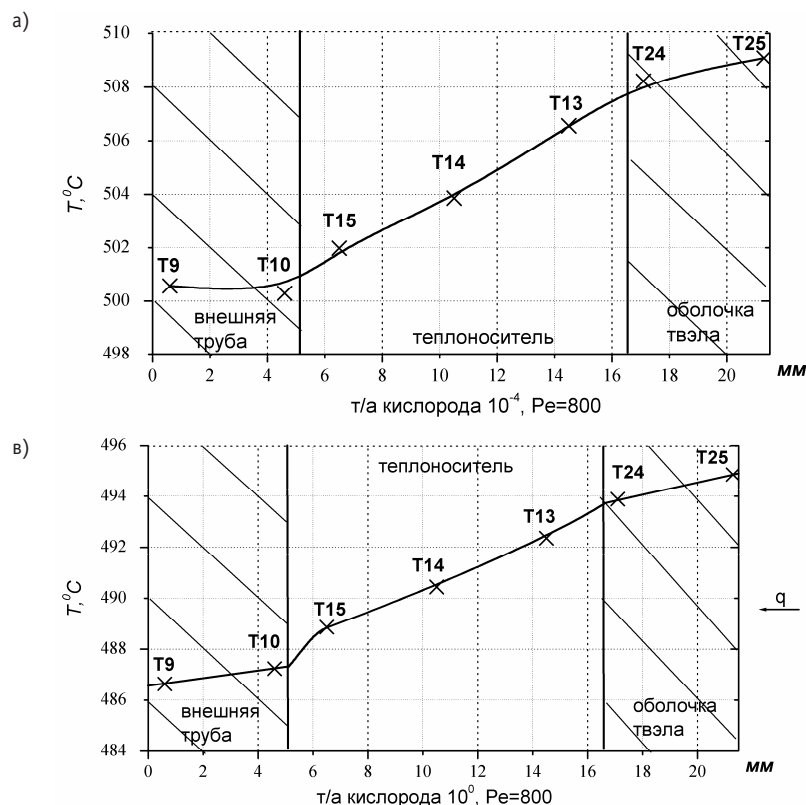


Рис. 5. Локальный профиль температур в кольцевом зазоре от электрообогреваемой трубы из стали 10Х9НСМФБ при различном содержании примеси кислорода в контуре

чении конвективного теплообмена. При $Re = 590-750$ максимальная разница между показаниями крайних микротермопар в термозонде составляла $6,5-7,0^\circ\text{C}$; при $Re = 2600-2700$ – $4,5-4,8^\circ\text{C}$; при $Re = 4525-4750$ – $4,0-4,2^\circ\text{C}$.

На рис. 7–9 представлены зависимости безразмерной нормированной температуры от нормированного расстояния r/r_0 (r_0 – радиус поперечного сечения за-

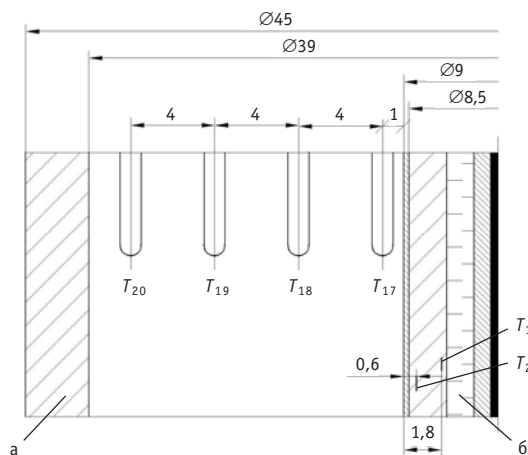


Рис. 6. Схема расположения микротермопар термозонда в кольцевом зазоре между трубчатый электронагревательным элементом и чехловой трубой: а) – труба чехловая, б) – ТЭН

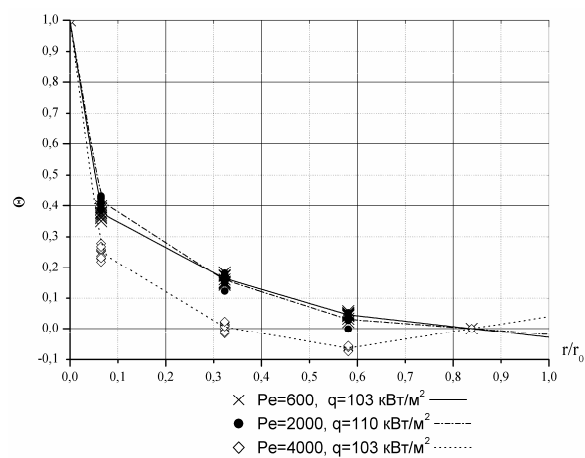


Рис.7. Локальный профиль температур, 157 ч работы стенда; $a = 5 \cdot 10^{-1}$ (саморегулирование Ar)

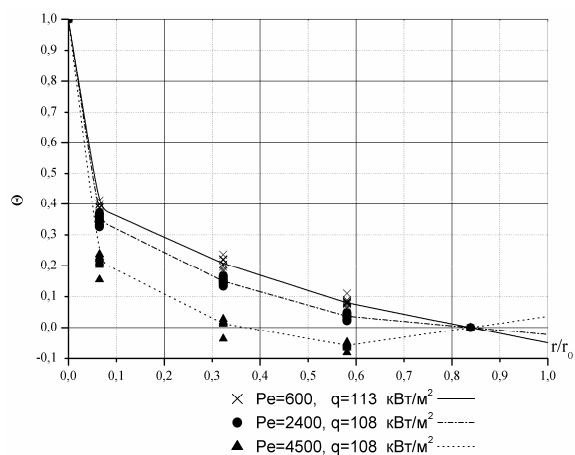


Рис. 8. Локальный профиль температур, 229 ч работы стенда; $a = 7,7 \cdot 10^{-1}$ (обработка O_2 , введено 30 г)

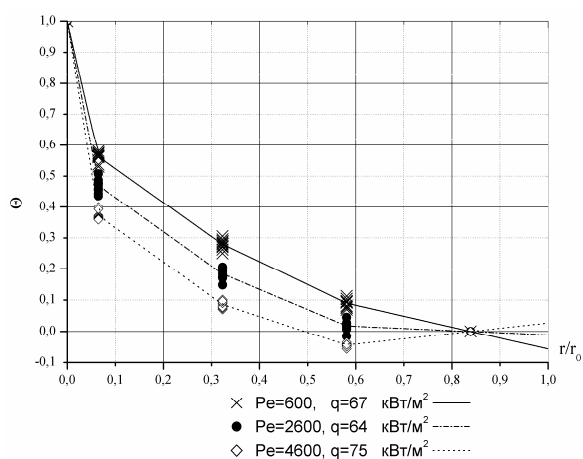


Рис. 9. Локальный профиль температур, 349 ч работы стенда; $a = 2 \cdot 10^{-4}$ (обработка H_2)

зора) от теплопередающей стенки: $\Theta = \frac{t - t_f}{t_w - t_f}$, где t – переменное значение тем-

пературы в потоке ТЖМТ по радиусу поперечного сечения в зазоре между поверхностью ТЭНа и наружной стенкой, вблизи поверхности ТЭНа ($t = t_{max}$), t_w – температура на внешней поверхности оболочки электронагревательного элемента, t_f – температура теплоносителя вдали от поверхности теплообмена (T_{20}) (см. рис. 6).

Эти графики показывают, что профиль температур в ядре потока несколько уплощается при числах Пекле ~ 2500 , что вероятнее всего связано с некоторой локализацией основного теплоперепада в пристенной области. Ввод кислорода практически не влияет на данный профиль, можно отметить только увеличение скачка температур в пристенной области для малого числа Пекле ($Pe \sim 500$).

Значение величины термодинамической активности кислорода в ТЖМТ, технологический режим обработки теплоносителя (ввод O_2 , ввод H_2 , саморегулирование в среде Ar в системе газа) в неизотермическом контуре практически не влияют на характеристики теплового пограничного слоя и на безразмерный профиль температуры вблизи «горячей» стенки.

Из графиков 7–9 видно, что тепловой пограничный слой занимает большую часть (80–90%) зазора при $Pe = 2500$ –4500 и 100% при $Pe = 500$. На участке 20–30% величины безразмерного радиуса температура изменяется линейно, что говорит о подавляющем влиянии теплопроводности на этом участке. Угол наклона этих прямых практически не зависит от содержания кислорода в теплоносителе в неизотермическом контуре и от режима технологической обработки контура (ввод O_2 , ввод H_2 , саморегулирование в среде Ar в системе газа). Угол наклона этой линии незначительно зависит от величины числа Pe в диапазоне 500–4500 и практически не зависит от величины теплового потока q в диапазоне 67–112 кВт/м². Также можно отметить, что профиль температур зависит от числа Пекле, теплового потока и состояния пристенной области течения теплоносителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании исследований можно сделать вывод о качественном отличии определяемых одновременно характеристик теплообмена на участках нагрева и охлаждения теплоносителя во всем исследованном диапазоне содержания кислорода в тяжелом жидком металле. Наибольшее расхождение этих характеристик фиксируется в случае ввода в систему кислорода в количестве, превышающем растворимость и приводящем к образованию твердой фазы оксидов теплоносителя. На горячей поверхности образование отложений оксидов свинца не фиксируется.

Экспериментально определенные профили температур в потоке свинца в каналах неизотермического контура с регулированием и контролем содержания примесей показывают, что вблизи «горячей» стенки профиль температур в размерных и безразмерных координатах – линейный. С увеличением значения числа Pe профиль температур в потоке уплощается.

Оценка разницы температуры стенки внутренней поверхности теплоподводящего экспериментального участка (вычисленной с учетом показаний поверхностных и заглубленных в стенку термопар) и температуры свинца у этой стенки по показаниям термопары термозонда (установленной на расстоянии $\sim 1,0$ мм от стенки), с учетом локального теплового потока показывает, что максимальное значение этой величины в условиях экспериментов составило до 12°C.

Литература

1. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / Под ред. П.Л. Кириллова. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
2. Безносков А.В., Молодцов А.А., Семенов А.В. и др. Теплоотдача от свинцового теплоносителя к продольно обтекаемой трубе // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – № 3. – С. 83-90.
3. Безносков А.В., Молодцов А.А., Семенов А.В. и др. Программа-методика проведения исследований теплоотвода от свинцового теплоносителя для верификации рабочих методик (продольное обтекание круглой трубы) на стенде ФТ-2А, ФТ-1ТО. – НГТУ, 2005.
4. Безносков А.В., Новожилова О.О., Молодцов А.А. и др. Характеристики теплообмена моделей поверхностей активной зоны и парогенератора при регулировании содержания примесей в контуре со свинцовым теплоносителем // Атомная энергия. – 2008. – Т. 104. – Вып. 2. – С. 74-80.
5. Комплексные исследования теплоотвода от свинцового теплоносителя для верификации рабочих методик (продольное обтекание горизонтальной круглой трубы): Отчет о НИР (заключ.) / Нижегородский государственный технический университет; рук. А.В. Безносков. – Н.Новгород, 2007, 168 с. (исполн. А.А. Молодцов, А.В. Назаров, Т.А. Бокова и др.). – № ГР 01.2.006 08891. – Инв. № 0200708668.
6. 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, 2003.

Поступила в редакцию 12.05.2008

natural uranium at partial loading a reactor by thorium are analyzed. The high neutron economy of the CANDU reactor, its ability to be refuelled while operating at full power, its fuel channel design, and its simple fuel bundle provide an evolutionary path for allowing full exploitation of the energy potential of thorium fuel cycles in existing reactors. The open thorium fuel cycle in CANDU reactors provides an evolutionary approach to exploiting the energy potential of thorium. Use of the thorium fuel cycle in CANDU reactors ensures long-term supplies of nuclear fuel, using a proven, reliable reactor technology.

УДК 539.1

The Determination of the average Charge in the Ion Chamber \ S.A. Morozov, D.M. Shvetsov, P. S. Shutov, S.S. Shutov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnich zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 6 pages, 2 tables. – References, 8 titles.

A method of the average charge measurements per neutron registration in the ion chamber has been described.

The method consists of two parts. The first part includes measurement of the average current and its spectral power density measurements. The second one consists in measurement of the amplitude spectrum in relative units.

In this article the algorithm of processing of experimental results with the purpose of calculation of an average charge per neutron registration is described. The method was used for KHT-25 chamber. The average charge is equal to $(2,02 \pm 0,18) \cdot 10^{-13}$ C.

УДК 621.039.542

Experimental Study of the Processes of Heat Exchange and Profiles of Temperature of the Flow of the Heavy Liquid Metal Heat-Transfer Agent \ A.V. Besnosov, O.O. Novozhilova, S.Yu. Savinov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnich zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 11 pages, 9 illustrations. – References, 6 titles.

In this article are presented results of the experimental studies of the heat exchange to the lead heat-transfer agent in the annular clearance in the circulation contour with the controlled and operated processes of mass exchange and mass transfer of the oxygen admixture. The studies have been carry out in the non-isothermal contour (in this article the results of the experiments received in the heat-extended experimental section the imitator fuel element of the active zone) with the circulation of lead heat-transfer agent at a temperature 450–550°C, the average velocity of the heat-transfer agent 0.1 – 1.5 м/с, Peclet number 500 – 6000 and average heat flow 50 – 160 kW/m². The Contents of the oxygen in different point of the sidebar was supported within the range of thermodynamic activity of the oxygen 10⁻⁵–10⁰. The oxygen content at different points of contour was supported in the range of the thermodynamic activity of oxygen 10⁻⁵ – 10⁰. Processes in the non-isothermal liquid-metal contour with the heating (the imitator of the fuel element of the active zone) experimental section simulate the dependence of the characteristics of heat exchange in the contour on the characteristics of the mass transfer of admixtures.

УДК 621.039.5

Numerical Simulation of Velocity Distribution and Water Pressure in Reactor Model Setting \ I.A. Chusov, V.A. Sarkisov, Yu.S. Yuryev, D.V. Zaytsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnich zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 9 illustrations, 1 table. – References, 15 titles.

The velocity distribution, pressure in the header and the flowrates in working channels of two loops reactor plant hydraulic model were obtained in the paper based on three-dimensional numerical calculations. Calculations were carried out both for the standard operation mode and for case of the reduction of one of the feed water pumps delivery till the full shutdown. It was shown that it brings to the significant re-distribution of the flowrates in the channels. The analysis of the eddy zones in the lower header and in the downhole circular channel has been performed.