

УДК 621.039.534

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОТДАЧИ ОТ СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ К ПРОДОЛЬНО ОБТЕКАЕМОЙ ТРУБЕ**

**А.В. БЕЗНОСОВ, А.А. МОЛОДЦОВ, А.В. НАЗАРОВ, С.Ю. САВИНОВ,  
О.О. КУДРИН**

*Нижегородский государственный технический университет*

Приводятся 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 жидкометаллическим теплоносителем. Цель работы — получение обоснованных расчетных формул для инженерных расчетов поверхностей теплообмена. Исследования проводились при температуре свинца 400–500 °С, средней скорости теплоносителя 0,1–1,5 м/с, диапазоне чисел Прандтля 0,0123–0,0211 и чисел Пекле 500–7000. Величина теплового потока изменялась в диапазоне 50–160 кВт/м<sup>2</sup>. Управляемо изменяемое содержание примеси кислорода изменялось от величины термодинамической активности кислорода от  $10^{-5}$ – $10^0$  до насыщения и выше, с образованием отложений оксида свинца вблизи теплопередающей поверхности.

В Нижегородском техническом университете проведены экспериментальные исследования 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 жидкометаллическим теплоносителем. Целью проведенной работы являлось получение обоснованных расчетных формул для инженерных расчетов поверхностей теплообмена. Исследования проводились при температуре свинца 400–520 °С, средней скорости теплоносителя 0,1–1,5 м/с, числах Прандтля 0,0123–0,0211, числах Пекле 500–7000 и тепловом потоке 50–160 кВт/м<sup>2</sup>. Содержание примеси кислорода изменялось от термодинамической активности кислорода  $10^{-5}$ – $10^0$  до насыщения и выше, с образованием отложений оксида свинца вблизи теплопередающей поверхности.

В последнее время появились новые средства контроля характеристик тяжелого жидкометаллического теплоносителя (ТЖМТ) и современная экспериментальная техника с компьютеризированной обработкой экспериментальных данных, это делает возможным уточнение ранее созданных расчетных кодов с учетом специфики тяжелого жидкометаллического теплоносителя, а также 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 тяжелым жидкометаллическим теплоносителем являются исследования следующих взаимосвязанных процессов:

– 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 тяжелого жидкометаллического теплоносителя, 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;

– гидродинамики потока в локальных участках контура, определяющей динамику накопления и количества примесей в пристенной области этих участков.

Традиционные расчетно-теоретические исследования характеристик теплообмена жидкометаллических 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 [1–8].

В первой группе критериальные зависимости теплообмена формируются в виде

$$\text{Nu} = A \text{Pe}^n B, \quad (1)$$

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

Во второй группе (более поздние исследования) критериальные зависимости теплообмена имеют вид

$$\text{Nu} = A + K \text{Pe}^n B, \quad (2)$$

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, содержащего дисперсные частицы примесей оксидов теплоносителя, соединения конструкционных материалов и газов.

Эти примеси могут концентрироваться в пристенной области и откладываться на теплопередающих поверхностях. 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.

Исследования проводились с использованием двух жидкометаллических циркуляционных стендов одновременно. Циркуляционные контура 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 свинцу-висмуту, при существенно более низких давлениях в стенде, чем при использовании воды в контуре охлаждения.

Характеристики контура свинцового теплоносителя: расход свинца до  $7 \text{ м}^3/\text{час}$ , температура свинца до  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , мощность электронагревателей до  $50 \text{ кВт}$ , напор циркуляционного электронасоса (разработка и поставка НГТУ) с частотным регулированием оборотов до  $8 \text{ кгс/см}^2$ , материал оборудования, трубопроводов и арматуры — сталь типа 12X18H10T.

Характеристики контура свинец–висмутового теплоносителя: расход теплоносителя до 10 м<sup>3</sup>/час, температура теплоносителя до 600 °С, 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<sup>2</sup>, материал оборудования, трубопроводов и арматуры — сталь типа 12Х18Н10Т.

Оба контура 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 (ДАК) в ТЖМТ поставки ГНЦ РФ Физико-энергетического института. В свинец-висмутовом контуре 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.

Экспериментальный участок (рис. 1, 2) выполнен в виде вертикально ориентированных коаксиально расположенных труб ( $d_2/d_1 = 2,35$ ). Внешняя труба длиной 1348 мм, 45×2,5 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 сая 1,0 мм (в капилляре) с индивидуальной градуировочной характеристикой (0,2 °С).

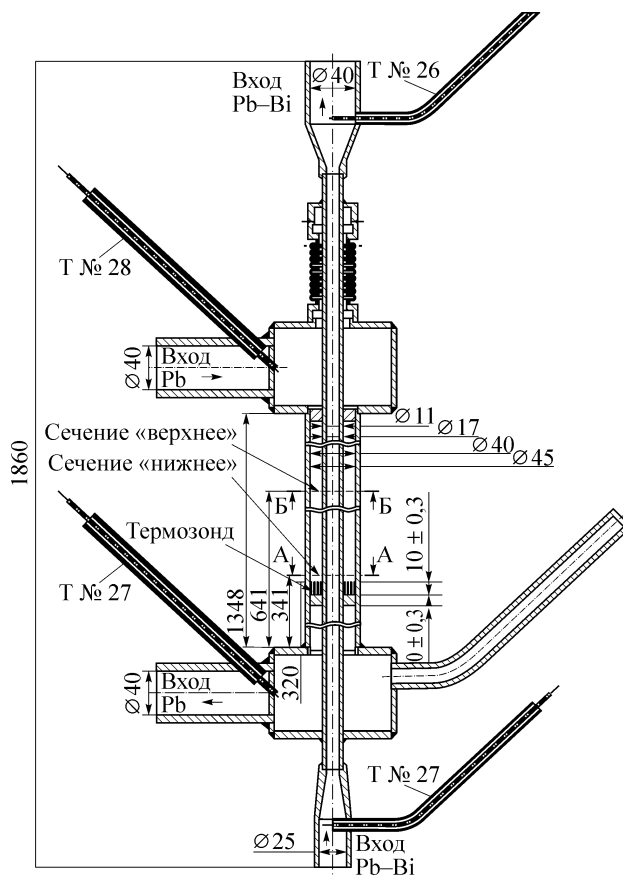


Рис. 1. Схема экспериментального участка.

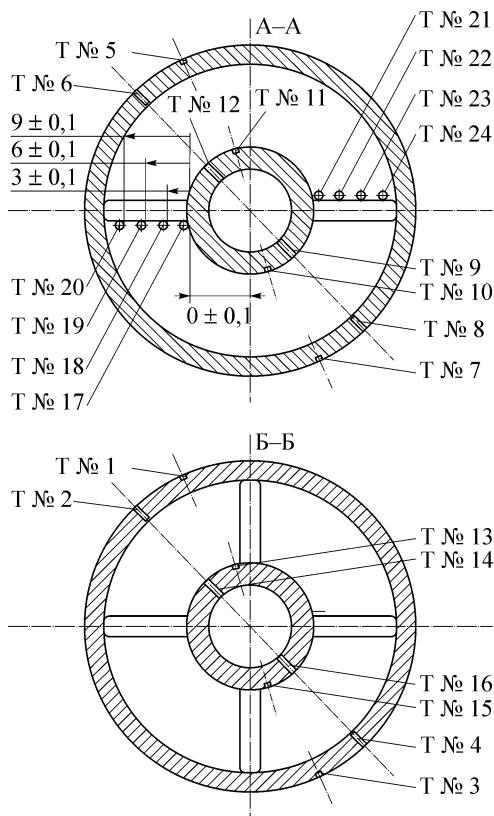


Рис. 2. Схема заделки термопреобразователей.

В двух сечениях внутренней и наружной труб экспериментального участка установлено по 8 микротермопар (в капилляре) с индивидуальной градуировочной характеристикой ( $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Для определения локального теплового потока в каждом из двух сечений устанавливаются по два микротермопреобразователя на “наружной” поверхности трубы через  $180^{\circ}$  по периметру и по два микротермопреобразователя — на “внутренней” поверхности трубы. 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 металлизуются. Глубина каждого паза до закладки термопреобразователя

измерялась. На входе и на выходе каждого теплоносителя установлены погружные термопреобразователи.

Схема теплообменных потоков в процессе экспериментов представлена на рис. 3.

Сводный график характеристик испытаний и контура в процессе всех этапов этой серии испытаний приведен на рис. 4, а на рис. 5 — сводный график локальных характеристик теплообмена.

В процессе экспериментов определено, что характеристики теплоотдачи при довольно низкой активности кислорода ( $10^{-5}$ – $10^{-4}$ ) близки к теоретическим расчетным данным для чистых металлов [1, 2] и условий смачивания поверхности теплоносителем и к экспериментальным данным теплообмена от нагретой стенки, охлаждаемой свинцом.

В целом, зависимости можно описать функцией

$$\text{Nu} = 7 + 0,025\text{Pe}^{0,8}. \quad (3)$$

Данные исследований еще раз подтверждают, что в отсутствии значительных отличий массопереноса примесей, состояния пристенной области, характеристик потока и поверхностей конструкционных материалов характеристики теплообмена для свинца близки к ртути и щелочным металлам и не зависят от направления теплового потока [9].

Введение кислорода в контур последовательно приводило к ухудшению характеристик теплообмена на охлаждаемых поверхностях. Локальные характеристики теплообмена в различных сечениях и сериях экспериментов, особенно неусредненные, могут значительно отличаться друг от друга. По опыту авторов такая ситуация характерна для тяжелого жидкометаллического теплоносителя, поскольку

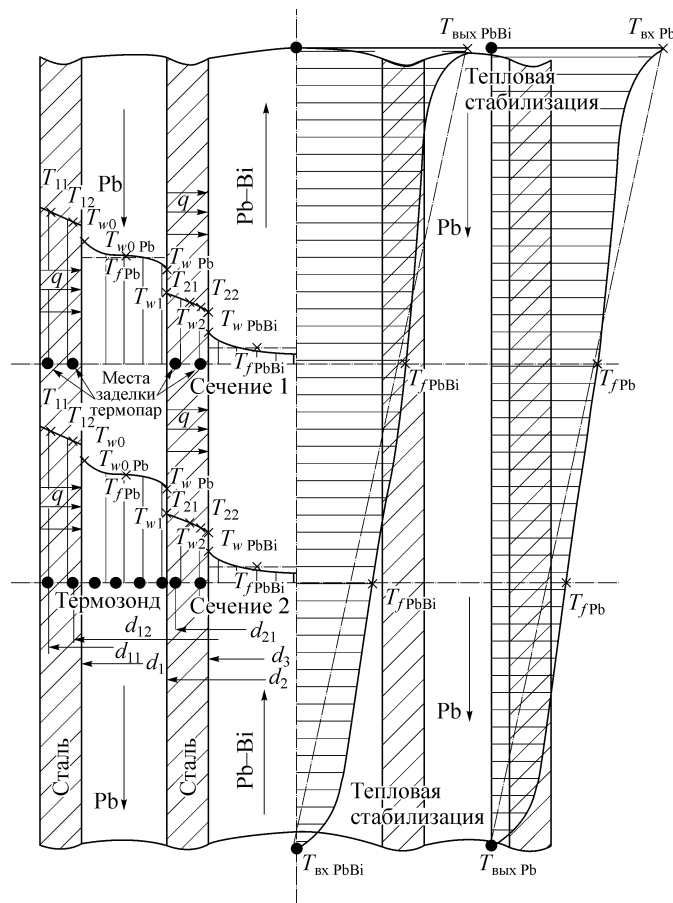


Рис. 3. Схема тепломассообменных потоков.

в данном случае даже небольшие различия локальной гидродинамики и массопереноса приводят к значительному перераспределению тепловых потоков.

В штатном диапазоне термодинамической активности кислорода ( $10^{-2}$ – $10^{-5}$ ) параметры теплообмена на охлаждаемой поверхности варьируются между зависи-

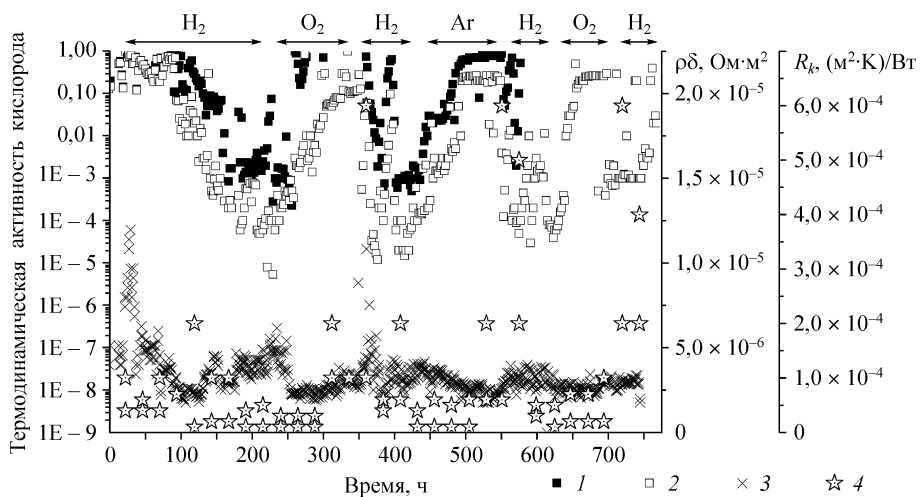


Рис. 4. Сводные данные проведенных исследований.

ДАК1 (1), ДАК2 (2),  $\rho\delta$  — удельное электросопротивление оксидных покрытий (3),  $R_k$  — контактное пристенное термосопротивление (4).

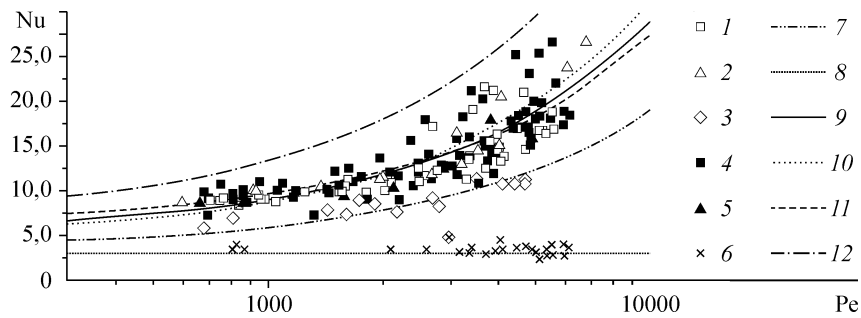


Рис. 5. Локальные характеристики теплообмена, сводный график.

Саморегулирование в атмосфере Ar (1, 2), саморегулирование в атмосфере Ar,  $10^0 < a < 10^{-1}$  (3), восстановление контура ( $H_2$ ),  $10^{-4} < a < 10^{-2}$  (4), восстановление контура ( $H_2$ ),  $10^{-2} < a < 10^{-1}$  (5), избыток кислорода, отложение оксидов в контуре (6),  $Nu = 7 + 0,025 Pe^{0,8}$  (7),  $Nu = 6,2 + 0,013 Pe^{0,8}$  (8),  $Nu = 5,25 + 0,015 Pe^{0,8}$  (9),  $Nu = 4,5 + 0,017 Pe^{0,8}$  (10),  $Nu = 3,4 + 0,01 Pe^{0,8}$  (11),  $Nu = 3$  (12).

мостями (3) — наилучший случай и усредненной зависимостью

$$Nu = 6,2 + 0,013Pe^{0,8}, \quad (600 < Pe < 6000, 10^{-2} < a < 10^{-4}). \quad (4)$$

В нештатном диапазоне термодинамической активности кислорода ( $5 \cdot 10^{-1} - 10^{-2}$ ) в зависимости от предыстории контура изменения характеристики теплообмена описываются усредненными зависимостями соответственно увеличению термодинамической активности кислорода

$$Nu = 4,5 + 0,017Pe^{0,8}, \quad (600 < Pe < 6000, 10^{-1} < a < 10^{-2}), \quad (5)$$

$$Nu = 3,4 + 0,01Pe^{0,8}, \quad (600 < Pe < 6000, 0,5 < a < 10^{-1}). \quad (6)$$

При этом, необходимо отметить, что зависимости (4) и (5) в диапазоне чисел Пекле 1000 ... 3000 приводят к практически одинаковым результатам, т. к. экспериментальные данные соответствующих серий измерений в этом промежутке очень близки и описываются усредненной зависимостью

$$Nu = 5,25 + 0,015Pe^{0,8}, \quad (1000 < Pe < 3000, 0,5 < a < 10^{-2}). \quad (7)$$

Характеристики теплообмена с введением значительного количества кислорода, образующего массы отложений нерастворимых оксидов свинца стремятся к определенной асимптоте. В данной серии экспериментов худшие характеристики теплообмена можно описать зависимостью

$$Nu = 3, \quad (600 < Pe < 6000). \quad (8)$$

Подобный характер зависимостей можно объяснить тем, что рыхлые оксидные отложения не превышают в условиях эксперимента 2 мм, поскольку их смывает потоком, а плотные оксидные покрытия такой толщины на стали при циркуляции не образуются.

Основное термическое сопротивление при избытке кислорода относительно насыщения свинца сосредоточивается в слое дисперсных частиц оксидов в пристенной области охлаждаемых поверхностей. Толщина этого слоя при фиксированной геометрии канала имеет гидродинамическое ограничение. Минимальное значение характеристик теплообмена ограничено функцией, стремящейся к константе.

По результатам данных и более ранних экспериментов, можно сделать предварительный вывод о качественном отличии характеристик теплообмена при нагреве и охлаждении тяжелого жидкометаллического теплоносителя в случае ввода в систему газообразного кислорода в количествах, превышающих растворимость и приводящих к образованию значительных масс оксидов теплоносителя.

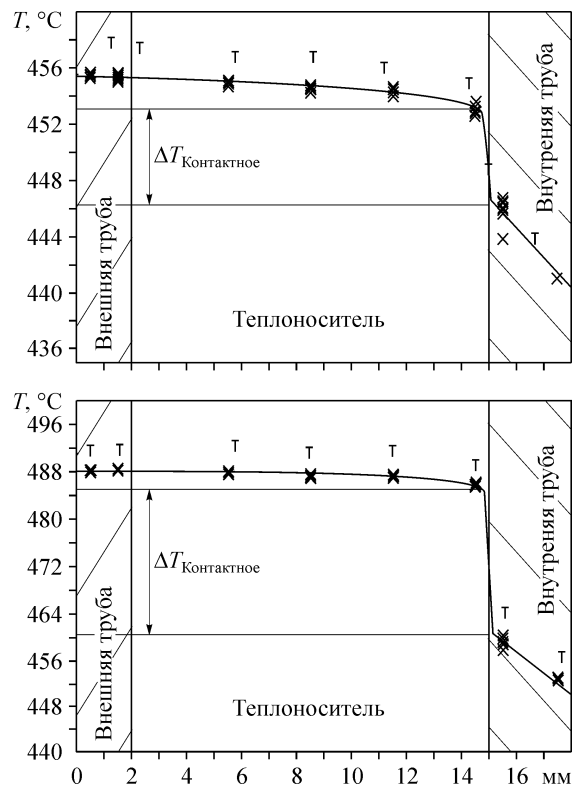
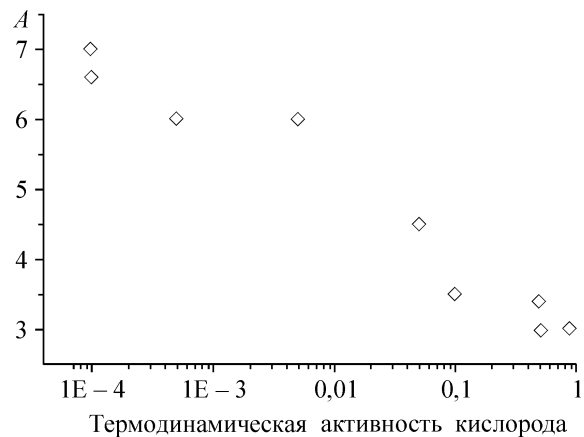


Рис. 6. Измеренные профили температуры по сечению экспериментального участка. Термодинамическая активность кислорода: сверху —  $1 \times 10^{-4}$ ,  $Pe = 4250$ ,  $q = 70$  кВт/м<sup>2</sup>; снизу —  $6 \times 10^{-1}$ ,  $Pe = 4100$ ,  $q = 75$  кВт/м<sup>2</sup>.

Рис. 6 иллюстрирует перераспределение профиля абсолютных температур по сечению потока теплоносителя, соответствующего переходу параметров теплообмена при введении кислорода от зависимости (4) к (8). Перепад температуры в пристенной области с появлением отложений на теплопередающих поверхностях может увеличиваться в 3,5 раза.

Комплекс проведенных исследований теплообмена от тяжелого жидкометаллического теплоносителя к стенке позволяет представить коэффициенты  $A$  и  $B$  в виде зависимости от контролируемого содержания примесей. Задаваясь предполагаемым в проекте энергетического контура с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем эксплуатационным содержанием примесей, можно обоснованно выбирать расчетные формулы теплообмена. Применительно к настоящим исследованиям на рис. 7, 8 представлена зависимость коэффициента  $A$  и  $B$  в формуле (2) от величины термодинамической активности кислорода в свинце. Из рис. 7 можно

Рис. 7. Зависимость значения коэффициента  $A$  в выражении (2) от контролируемой в процессе эксперимента величины термодинамической активности кислорода.



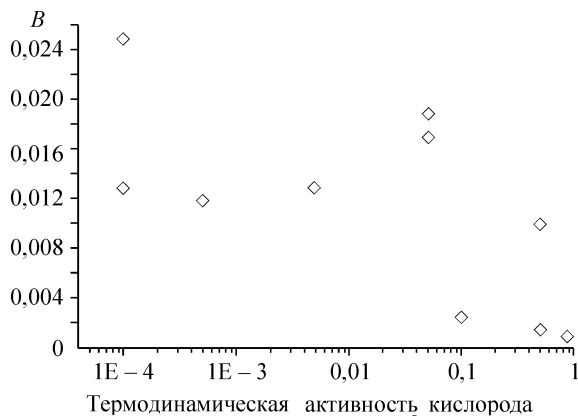


Рис. 8. Зависимость значения коэффициента  $B$  в выражении (2) от контролируемой в процессе эксперимента величины термодинамической активности кислорода.

предположить для коэффициента  $A$  наличие его логарифмической зависимости от содержания кислорода или, соответственно, от введенного в контур кислорода. Зависимость коэффициента  $B$  от содержания кислорода без

достаточного статистического материала выделить на данном этапе нельзя, однако отмечена пороговая зависимость с уменьшением  $B$  при различных историях контура при термодинамической активности кислорода  $> 0,1$ .

Проведенные исследования позволяют оценивать характеристики теплообмена тяжелого жидкометаллического теплоносителя от наличия, содержания и состояния примесей в пристенной области.

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

Объяснена и экспериментально подтверждена зависимость характеристик теплообмена между ТЖМТ и теплопередающей поверхностью от направления теплового потока.

Проведенные экспериментальные и расчетно-теоретические исследования характеристик теплообмена тяжелого жидкометаллического теплоносителя в условиях режимных характеристик энергетических контуров имеют практическое значение для разработки проектной и эксплуатационной документации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаченко, В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача / Уч. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 416 с.
2. Кириллов, П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / Под ред Кириллова П.Л. — 2-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 360с.
3. Рассохин, Н.Г. Парогенераторные установки атомных электростанций. — М.: Атомиздат, 1980. — 384 с.
4. Субботин, В.И., Минашин В.Е., Денискин Е.И. Теплообмен при поперечном обтекании пучков труб // Теплофизика высоких температур. — 1963. — Т. 1, № 2. — С. 238–246.
5. Боришанский В.М., Андриевский А.А., Жилкина В.Б., Шнейдерман Л.Л. Теплоотдача при поперечном обтекании пучков труб жидким металлом / Под ред. Боришанского В.М., Кутателадзе С.С., Лельчука В.Л., Новикова И.И. // Жидкие металлы. — М.: Госатомиздат, 1963. — С. 183.
6. Андриевский А.А. Теплоотдача к одиночной трубе в поперечном потоке с малым числом Прандтля // Инженерно-физический журнал. — 1959. — Т. 2. — С. 46–51.
7. Андриевский А.А. Теплоотдача при поперечном обтекании цилиндра расплавленным натрием // Атомная энергия. — 1959. — Т. 7, вып. 3. — С. 254–256.
8. Юрьев Ю.С., Ефанов А.Д. Коэффициент теплоотдачи при косом обтекании пучка твэлов и труб // Атомная энергия. — 1959. — Т. 59, вып. 1. — С. 66–67.
9. Безносов А.В., Молодцов А.А., Семенов А.В. и др. Теплоотдача от свинцового теплоносителя к продольно обтекаемой трубе // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. — 2006. — Вып. 3. — С. 83–90.

Статья поступила в редакцию 3 ноября 2006 г.