

А.В. Безносков, А.А. Молодцов, А.В. Назаров, А.В. Семенов, С.Ю. Савинов
Нижегородский государственный технический университет, Нижний Новгород, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОТДАЧИ ОТ СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ СОДЕРЖАНИЯ ПРИМЕСИ КИСЛОРОДА

АННОТАЦИЯ

Работа содержит результаты обработки экспериментальных данных, полученных авторами при исследовании параметров теплоотдачи от свинцового теплоносителя, текущего в кольцевом зазоре, к внешней поверхности круглой трубы и регулировании содержания примеси кислорода в теплоносителе (первый этап испытаний). В работе приведены характеристики экспериментального стенда, экспериментального участка, параметры экспериментов и сводные графические зависимости параметров теплоотдачи.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современная экспериментальная техника и более глубокое понимание физико-химических и теплофизических процессов в системах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями и накопленный опыт эксплуатации таких систем делают возможным уточнение созданных ранее соответствующих расчетных кодов с учетом специфики теплоносителя, реального исполнения контура, режимов его эксплуатации, контролируемого физико-химического состояния примесей в теплоносителе и контуре и др.

В Нижегородском государственном техническом университете спроектирован и создан циркуляционный жидкометаллический стенд и проводятся экспериментальные исследования зависимости теплоотдачи от свинцового теплоносителя к круглой трубе в кольцевой щели в условиях целенаправленного изменения содержания кислорода в теплоносителе и контуре.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальный стенд представляет собой два контура теплоносителей, объединенных в экспериментальном участке, причем исследуемый свинцовый теплоноситель охлаждается свинец-висмутовым теплоносителем.

В состав контура свинцового теплоносителя входят: экспериментальный участок (рис. 1); циркуляционный насос с расходом до $6 \cdot 10^4$ кг/час, напором до 5 кгс/см^2 ; нагреватель мощностью 5 кВт , обеспечивающий подогрев свинца до $600 \text{ }^\circ\text{C}$; буферная емкость объемом ок. $0,1 \text{ м}^3$; расходомерная

емкость; системы заполнения очистки и дренажа; газовая система; система КИП и др. Экспериментальный участок выполнен в виде электрообогреваемого корпуса из трубы $45 \times 2,5 \text{ мм}$ из стали 12Х18Н10Т. В нем размещена коаксиально труба $17 \times 3,0 \text{ мм}$ из ферритно-мартенситной стали 10Х9НСМФБ длиной 1500 мм и двумя симметричными термозондами по 4 термопреобразователя в каждом. В двух сечениях ($l/d=17; 25$) корпуса выполнены по 4 паза с размещенными в них термопреобразователями. В этих же сечениях в стенке внутренней трубы выполнены по 4 паза с размещенными в них термопреобразователями (рис. 1). Данные с первичных приборов установленных на экспериментальном участке, а так же с датчиков активности кислорода и магнитных расходомеров собираются и обрабатываются компьютеризированной системой. Программное обеспечение позволяет: получать и обрабатывать данные с разрешением по времени до $0,3 \text{ с}$, рассчитывать теплофизические константы материалов и производить расчет чисел Nu и Pe , отображать в реальном времени измеряемые параметры и результаты расчета, сохранять данные.

Отвод тепла от свинцового теплоносителя осуществляется эвтектикой свинец-висмут, прокачиваемой по внутренней трубе, подключенной к соответствующему циркуляционному контуру.

Испытания проводились согласно следующим этапам:

- Отработка методики формирования отложений примеси оксидов свинца на стенках контура и экспериментального участка.

- Отработка методик удаления отложений примеси оксидов свинца со стенок контура и экспериментального участка.

- Экспериментальное определение зависимости $Nu=f(Pe)$ при значениях термодинамически активного кислорода в свинце « a_{O_2} » от $10^{-4} - 10^{-5}$ до 10^0 , а также при формировании слоя отложений примесей на теплопередающей поверхности 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.

- Ревизия состояния стенда и экспериментального участка.

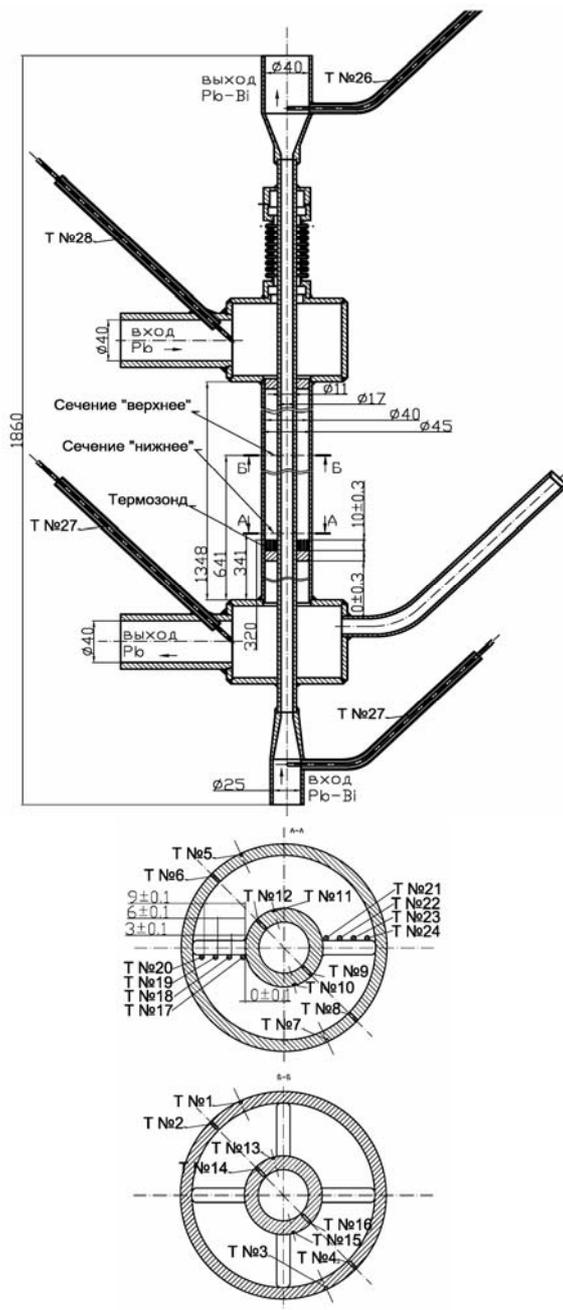


Рис. 1. Схема экспериментального участка и заделки термопреобразователей

Эксперименты проводились при непрерывной циркуляции свинцового теплоносителя при температуре 400 – 550°C и свинец-висмутового теплоносителя при температуре 350 – 450°C (рис. 2). Регулирование содержания примеси кислорода производилось введением кислорода в составе воздуха эжектированием в теплоноситель с выдержкой под избыточным давлением аргона и выдержкой под избыточным давлением водорода. Контроль термодинамической активности кислорода производился датчиками конструкции ГНЦ РФ ФЭИ. Кроме того, проводились периодические измерения величины электропроводности оксидных покрытий электродов ($\rho\delta$), помещенных в емкость с постоянным потоком теплоносителя.

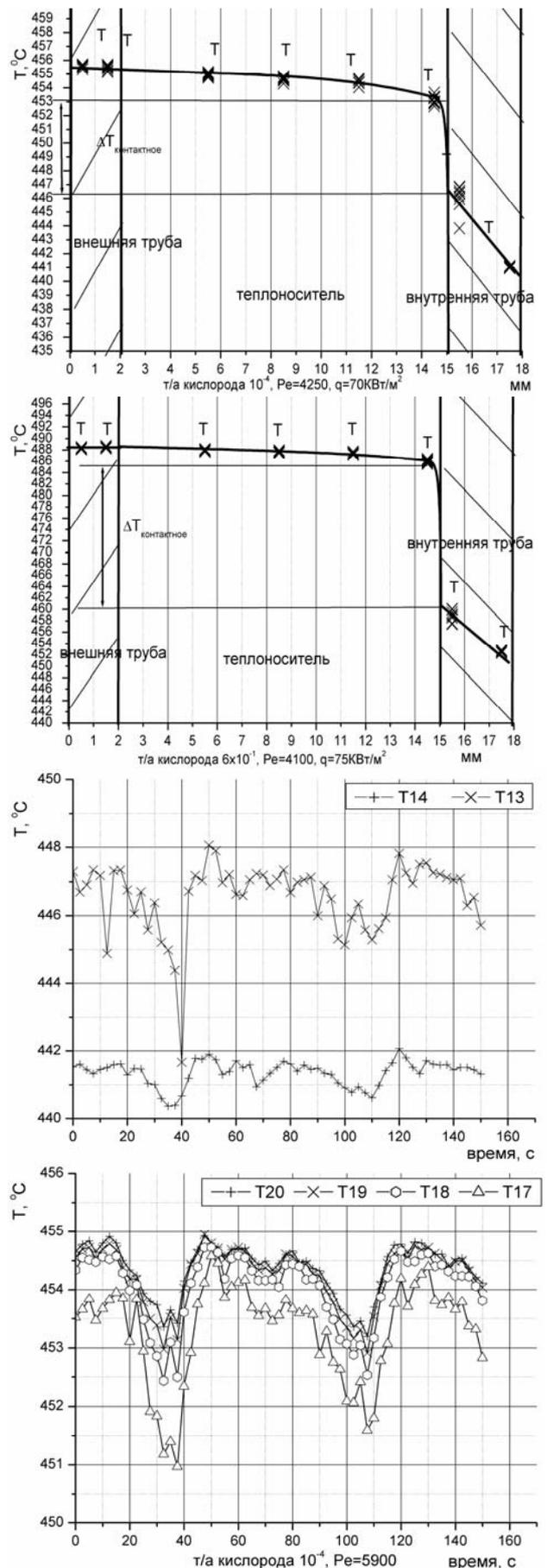


Рис. 2. Экспериментальные зависимости температуры по сечению экспериментального участка и зависимости температуры от времени

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эксперименты первого этапа в целом продолжались 150 часов непрерывной циркуляции. Последовательность эксперимента и временная зависимость величины электросопротивления покрытий, числа

Нуссельта, термодинамической активности кислорода и контактного термического сопротивления приведены на рис. 3.

Сводный график полученных локальных зависимостей $Nu=f(Re)$ и характерных общепринятых зависимостей приведены на рис. 4.

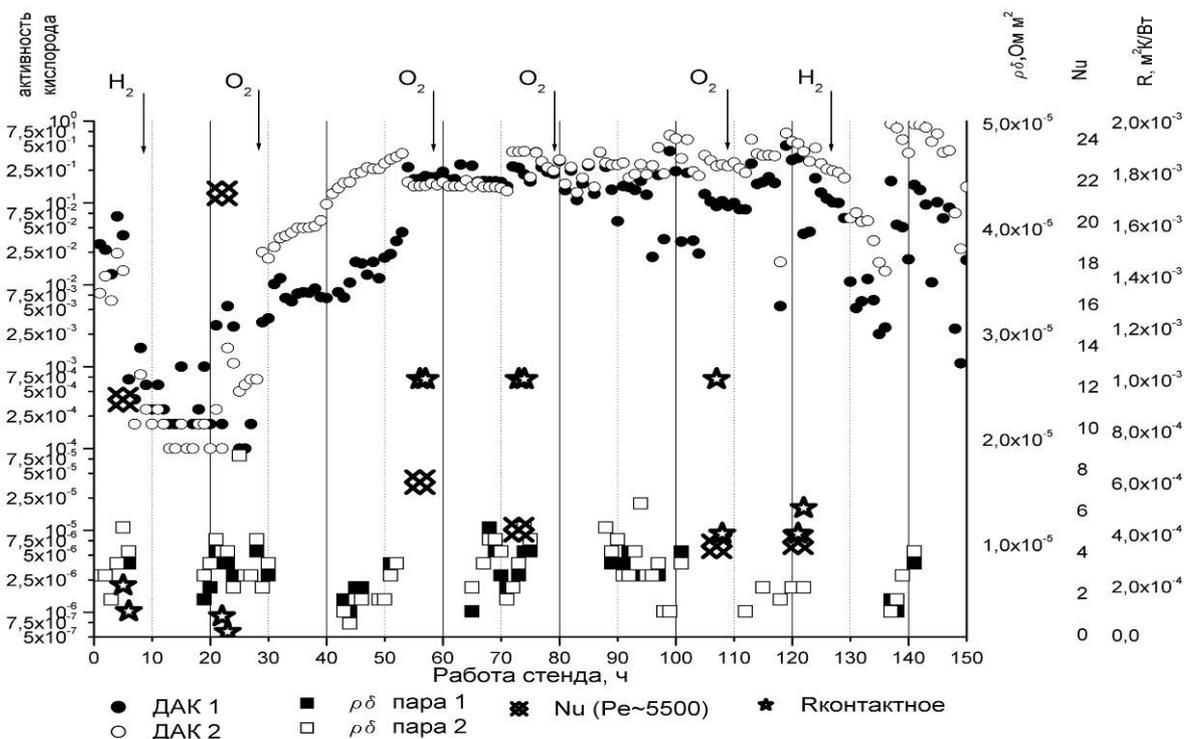


Рис. 3. Сводные данные проведенных исследований

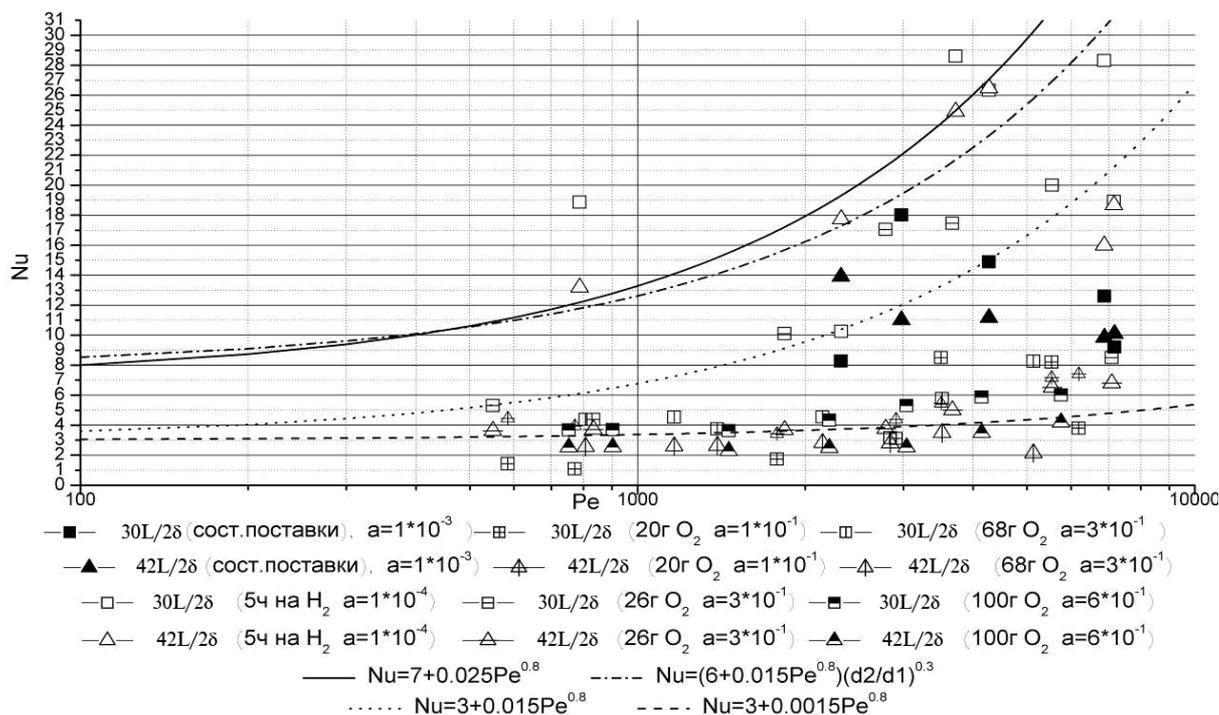


Рис. 4. Зависимости локальных характеристик теплообмена, сводный график

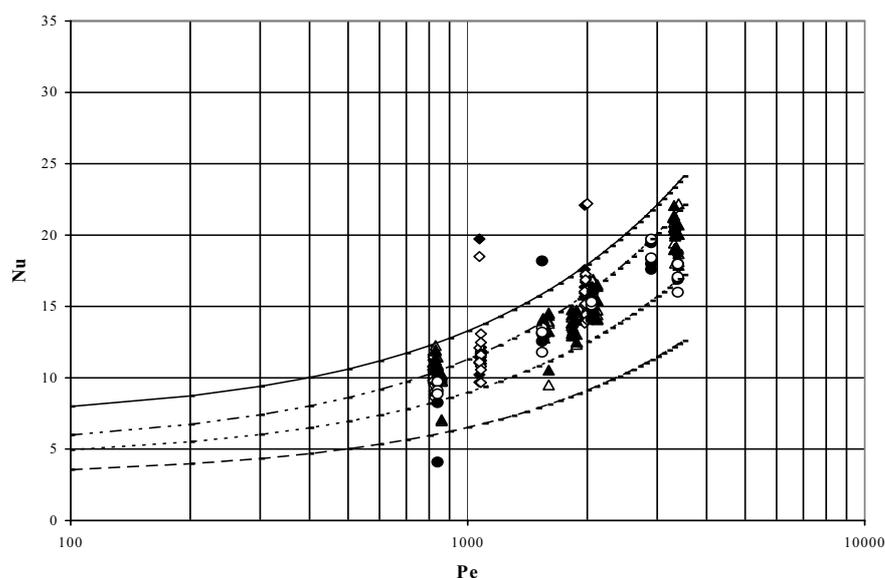


Рис. 5. Локальные характеристики теплообмена.
 Термодинамическая активность кислорода 10^{-6} – 10^0 . Данные Семенова А.В.
 ————— $Nu=7+0.025Pe^{0.8}$ - · - · - $Nu=5+0.025Pe^{0.8}$
 - - - - - $Nu=3+0.014Pe^{0.8}$ ······ $Nu=4,2+0.019Pe^{0.8}$

Зарегистрированы заметные пульсации взаимосвязанных температур в потоке жидкого металла и стенке трубы, что характерно для таких теплоносителей (рис. 2).

Характеристики теплоотдачи при довольно низкой активности кислорода (рис. 4) и, что важно, при отсутствии отложений примесей близки к расчетно-теоретическим и экспериментальным данным других исследователей для «чистых» металлов. Результаты исследований подтверждают факт, что при прямом контакте жидких металлов и конструкционных материалов характеристики теплообмена для свинца близки к аналогичным для ртути и щелочных металлов, а так же не зависят от направления теплового потока.

Введение кислорода в контур последовательно приводило к ухудшению характеристик теплообмена. Причем, необходимо заметить, что локальные характеристики сечений могут значительно отличаться друг от друга (рис. 2, 4). По опыту авторов такая ситуация достаточно характерна для свинца, так как в данном случае даже небольшие различия локальной гидродинамики и массопереноса приводят к значительному перераспределению тепловых потоков.

Характеристики теплообмена с введением кислорода можно описать зависимостью

$$Nu = 3 + 0.0015Pe^{0.8} \quad (1)$$

Результаты экспериментов (рис. 5) Семенова А.В. [1] на свинцовом теплоносителе по теплоотводу от подобной трубы из стали 10Х9НСМФБ показывают, что на «горячей» стенке не образуются отложения примесей при интенсивном вводе кислорода в контур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проводимых исследований получены характеристики теплообмена от свинца к стенке и контактного термического сопротивления в диапазоне $Re=10^4$ – $1,2 \times 10^5$ температур 380–550°C, при содержании примеси кислорода соответствующей величине термодинамической активности кислорода 10^{-5} – 10^0 и наличию отложений оксидов свинца при тепловых потоках до 80 кВт/м².

Отмечено существенное различие характеристик теплообмена при подводе и отводе тепла от свинцового теплоносителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов А.В. Теплообмен свинцового теплоносителя в круглой трубе и кольцевой щели при условии регулирования и контроля его примесей: Дис. ... канд. техн. наук. Н.Новгород, 2003.