

*А.В. Безносков, А.В. Семенов, А.А. Молодцов, А.В. Назаров, С.Ю. Савинов*

Нижегородский государственный технический университет, Нижний Новгород, Россия

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСИ КИСЛОРОДА НА ТЕПЛОТДАЧУ ОТ СТАЛЕЙ 10Х9НСМФБ И 12Х18Н10Т К СВИНЦУ И ЭВТЕКТИКЕ Li(17)Pb(83)

### АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований теплоотдачи от круглой трубы к свинцу и Li(17)Pb(83) при контроле и регулирование содержания примеси кислорода.

Исследования теплообмена проведены в диапазоне чисел Пекле 150–3550, Прандтля 0,0123–0,0211, Рейнольдса 7500–190 000, при удельном тепловом потоке ~15–50 кВт/м<sup>2</sup>, содержании термодинамически активного кислорода в свинце 10<sup>-7</sup>–10<sup>0</sup>.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы прошлого и в начале этого столетия после достаточно длительного перерыва вновь появился интерес к тяжелым жидкометаллическим теплоносителям. В России, США и др. странах предложены и продвигаются инновационные работы, направленные на создание быстрых реакторов, охлаждаемых ТЖМТ [1, 2].

Основной концепцией, принятой в настоящее время для перспективных ТЯР, является концепция т.н. «самоохлаждаемого» реактора с охлаждением blankets литием, «нарабатывающим» тритий – топливо для токамака. Отрицательным свойством лития, является пожароопасность и высокая химическая активность, поэтому применение в широких масштабах лития, вызывает обоснованные сомнения.

В настоящее время разрабатываются научно-технические основы и технологии применения свинец-литиевого теплоносителя в условиях контуров теплоотвода blankets ТЯР.

В связи с этим актуальной является задача получения экспериментальных и расчетных данных по закономерностям теплоотдачи к свинцовому и свинец-литиевому теплоносителю в круглой трубе при контроле и регулировании содержания примесей, уточнение критериальных зависимостей теплообмена и др.

### 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ К СВИНЦУ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ

#### 2.1. Описание экспериментального стенда

Стенд представляет собой контур ТЖМТ с центробежным насосом. Расход контролируется объемным методом – расходомерной емкостью, содержание кислорода в ТЖМТ – датчиками термодинамической активности на основе твердого гальвани-

ческого концентрационного элемента. Оборудование и трубопроводы, контактирующие с ТЖМТ, выполнены из стали 08Х18Н10Т, имеют электрообогрев и теплоизоляцию [3].

Измерение проводилось с применением компьютерной автоматизированной системы сбора и обработки информации.

#### 2.2. Описание экспериментальных участков

Исследования проводились на двух экспериментальных участках, расположенных вертикально (см. табл. 1), первый из ферритно-мартенситной стали 10Х9НСМФБ, второй из аустенитной стали 12Х18Н10Т.

Таблица 1. Описание ЭУ и параметров экспериментов

Основные размеры и параметры	Сталь 10Х9НСМФБ	Сталь 12Х18Н10Т	
	Свинец	Свинец	Свинец-литий
Внешний диаметр, мм	17	32	
Внутренний диаметр, мм	11	25	
Длина, мм: общая/обогреваемая	1570/1400	1850/1600	
Расположение термодатчиков по высоте (l/d)	31; 63,5; 95; 127	23; 33; 43	
Глубина заделки термодатчиков: min/max, мм	0,6/2,6	0,6/3,3	
Число Рейнольдса, ·10 <sup>-3</sup>	40 – 190	17 – 70	7,5 – 77
Число Пекле	800 – 3500	350–1450	150–1300
Удельный тепловой поток, кВт/м <sup>2</sup>	40 – 50	25 – 29	15–18
Продолжительность экспериментов, ч	150	250	–

В ЭУ установлены микротермодатчики ХА в нержавеющей капилляре с индивидуальной градуировочной характеристикой (погрешность градуировки ± 0,2 °С), чувствительная часть спая выполнена на поверхности нержавеющей капилляра и прокатана до диаметра 0,5 мм.

Температуру ТЖМТ на входе и выходе из ЭУ измеряли погружными термопарами ХА диаметром 3 мм.

В ЭУ из аустенитной стали 12Х18Н10Т ( $l/d = 48$ ) установлен термозонд, для измерения профиля температуры потока свинцового и свинец-литиевого теплоносителя, состоящий из 7 микротермопар, с диаметром чувствительной части 1 мм (4 шт.) и 0,5 мм остальные [3].

### 2.3. Методика проведения исследований

Формирование и поддержание защитных оксидных покрытий на внутренних поверхностях контуров с ТЖМТ и недопущение образования отложений примесей на теплообменных и других поверхностях, является необходимым условием безопасной эксплуатации энергетических установок.

Вследствие этого нами рассматривались как режимы нормальной эксплуатации, так и аварийные ситуации (межконтурная неплотность, разгерметизация газовой системы и др.), сопровождающиеся резким увеличением содержания примеси кислорода в контуре свинцового и свинец-литиевого теплоносителя.

Таким образом, экспериментальное определение зависимости  $Nu=f(Re)$  проводились согласно следующим этапам:

- выдержка под изб. давл. аргона;
- дозированный ввод  $O_2$  до состояния насыщения ( $a=10^0$ ), по окончании ввода осуществлялась выдержка под изб. давлением аргона до 30 часов;
- ввод  $H_2$  до значений термодинамически активного кислорода в ТЖМТ  $10^{-7} - 10^{-6}$ ;

- в конце этих этапов проводилась очистка контура 2-х компонентным потоком (ТЖМТ-газ) длительность до 4 часов.

Эксперименты проводились при постоянном тепловом потоке, расход ТЖМТ регулировался изменением частоты вращения насоса.

По окончании экспериментов проводилась ревизия состояния стенда и ЭУ с материаловедческим анализом поверхностей, контактирующих со свинцом и эвтектикой свинец-литий.

### 2.4. Обсуждение результатов

#### 2.4.1. Теплоотдача к свинцу

На рис. 1 представлено изменение основных параметров экспериментов с экспериментальным участком в виде электрообогреваемой круглой трубой диаметром 32x3,5 из аустенитной стали 12Х18Н10Т. Во всех проведенных экспериментах датчики термодинамической активности кислорода в свинце в различных участках циркуляционного контура синхронно реагировали на ввод газообразного кислорода, водорода и других газов ( $Ar, CO_2$ ).

С результатами, полученными на круглой трубе из ферритно-мартенситной стали, можно подробнее ознакомиться в [4].

На рис. 2 представлено изменение числа  $Nu$  при теплоотдаче от круглой трубы из аустенитной стали 12Х18Н10Т к свинцу при различных значениях термодинамической активности кислорода в свинце и различных методах регулирования примеси кислорода в свинце.

Ввод «сухого» водорода с течением времени приводит к ухудшению теплоотдачи.

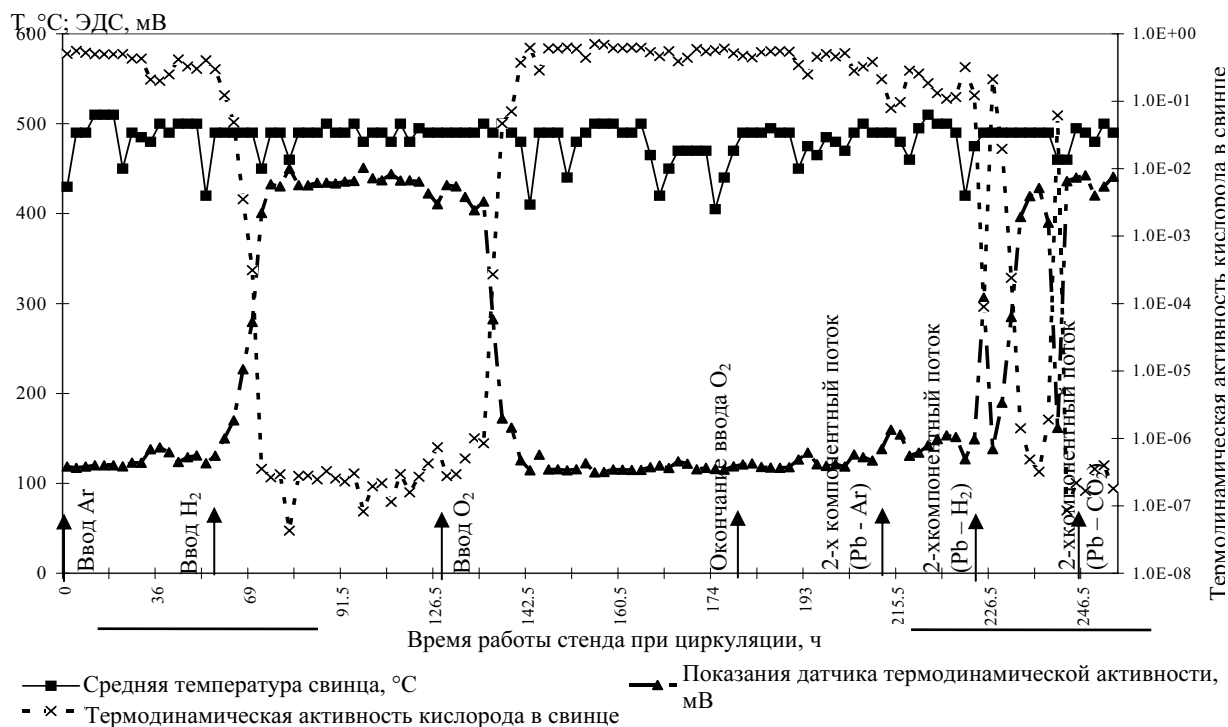


Рис. 1. Изменение ЭДС ГКЭ и термодинамической активности кислорода в свинце со сталью 12Х18Н10Т

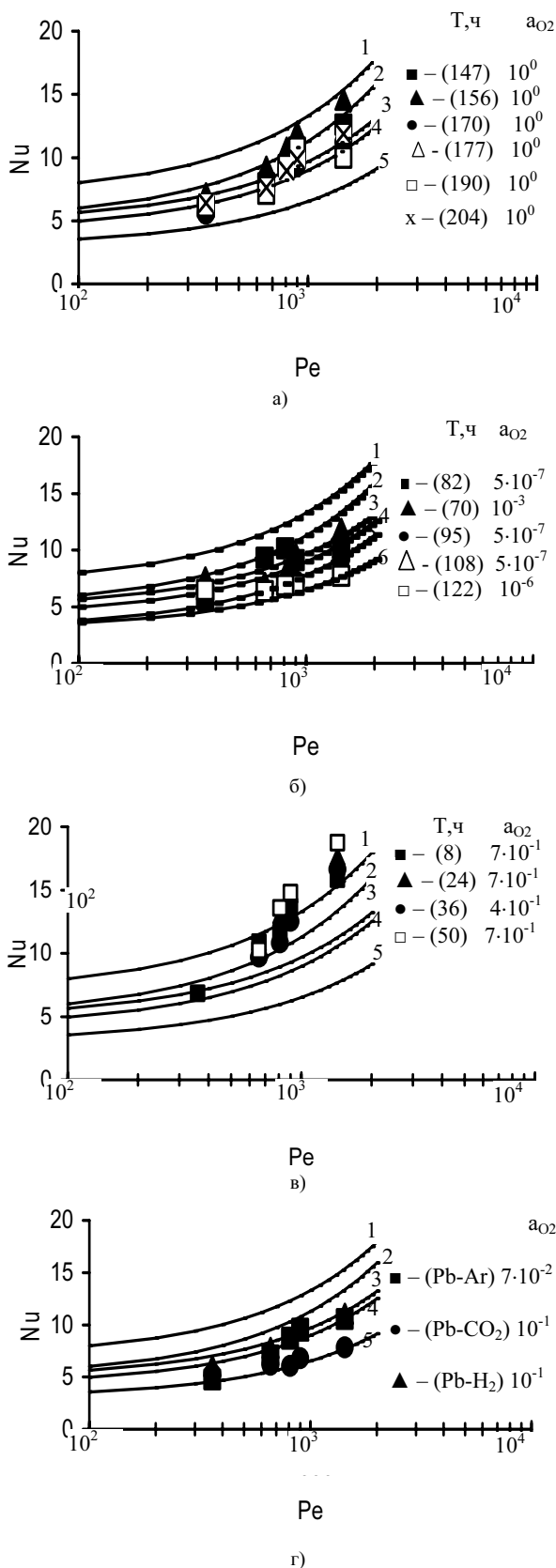


Рис. 2. Характеристики локальной теплоотдачи к потоку свинца от круглой трубы из стали 12Х18Н10Т: а – режим ввод O<sub>2</sub>; б – режим ввод H<sub>2</sub>; в – режим выдержки под изб. давлением Ar; г – режим очистки 2-х компонентными потоками (свинец – газ). 1 –  $Nu=7+0.025Pe^{0.8}$ ; 2 –  $Nu=5+0.025Pe^{0.8}$ ; 3 –  $Nu=4.2+0.019Pe^{0.8}$ ; 4 –  $Nu=4.9+0.019Pe^{0.8}$ ; 5 –  $Nu=3+0.014Pe^{0.8}$ ; 6 –  $Nu=3+0.019Pe^{0.8}$

Режимы, проведенные с созданием 2-х компонентного потока (свинец – газ) для проведения гидродинамической очистки внутренних поверхностей экспериментального участка и контура показывают следующее:

- 2-х компонентные потоки Pb-Ar и Pb-H<sub>2</sub> практически одинаково воздействуют на характеристики теплоотдачи;
- после эжектирования 2-х компонентным потоком свинец – CO<sub>2</sub> в течение 2-х часов замечено уменьшение теплоотдачи до значений, хорошо описываемых зависимостью:  $Nu=3+0,025Pe^{0.8}$ .

Основной массив данных, полученных в процессе экспериментов располагается между кривыми, описываемых выражениями ( $Nu=7+0.025Pe^{0.8}$ ) и ( $Nu=3+0.014Pe^{0.8}$ ).

Материаловедческий анализ показал, что толщина оксидных покрытий на образцах из стали 12Х18Н10Т, сформированных в свинцовом теплоносителе составляла 12 ÷ 30 мкм, из стали 10Х9НСМФБ до 5 мкм. Рельеф поверхности контакта аустенитной стали со свинцом имеет ямочное строение с переменной толщиной оксидного слоя. При определении микротвердости зафиксировано упрочнение зоны контакта со свинцом.

#### 2.4.2. Теплоотдача к эвтектике свинец-литий

Исследования характеристик теплообмена показали достаточно высокие значения локальных коэффициентов теплообмена от стенки электрообогреваемой круглой трубы из стали 12Х18Н10Т к эвтектике Li(17)Pb(83) (см. рис. 3). Практически все экспериментально определенные точки зависимости  $Nu=f(Pe)$  при  $Pe > 300$  располагались выше кривой  $Nu=3+0.014Pe^{0.8}$ , приближаясь к кривой  $Nu=4,2+0.019Pe^{0.8}$ .

Эти значения локальных характеристик теплообмена свинец-литиевого теплоносителя близки к значениям аналогичных характеристик свинцового теплоносителя [3]. Полученные результаты позволяют предполагать, что загрязнение свинец-литиевого теплоносителя и контура частицами примесей не оказывает заметного влияния на локальные характеристики теплообмена, и близки по значениям к аналогичным условиям теплообмена «чистого» свинцового теплоносителя.

При омывании стенок ЭУ двухкомпонентным потоком (Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> – водород) при газосодержании 0,3 ÷ 30 % (объемных) характеристики теплообмена оказались несколько выше, чем при однофазном течении. При этом значения зависимости чисел Нуссельта от чисел Пекле располагались между кривыми  $Nu=4,2+0.019Pe^{0.8}$  и  $Nu=4,9+0.019Pe^{0.8}$ . Ожидалось, что при двухкомпонентном потоке теплообмен несколько интенсифицируется за счет возможного разрушения приграничного слоя и уноса концентрирующихся вблизи стенок частиц примесей. С другой стороны, эжекция водорода

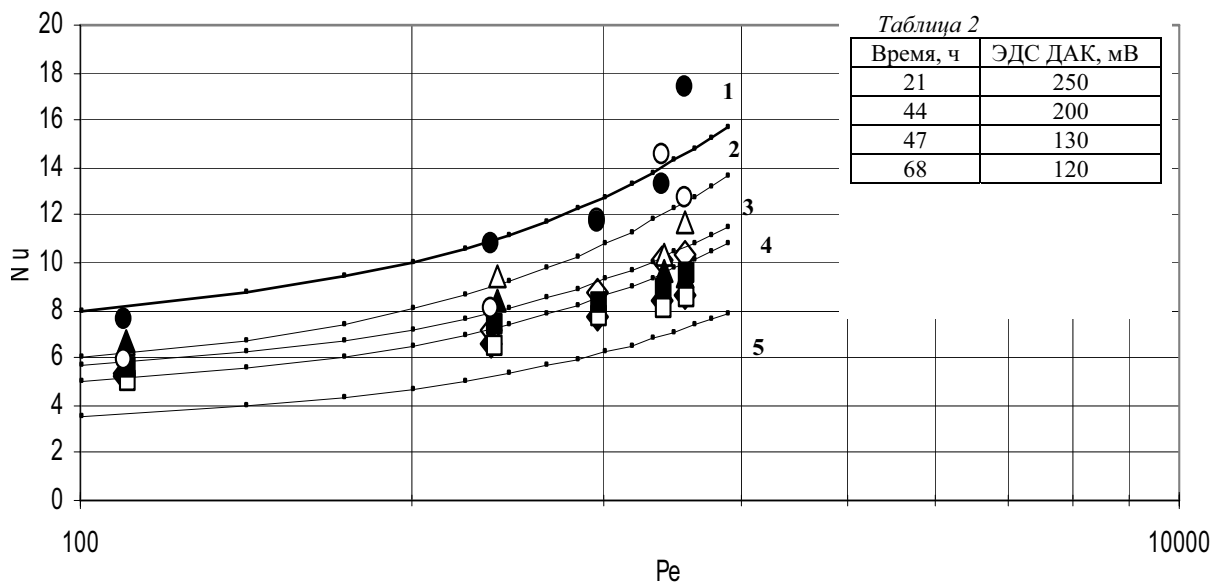


Рис. 3. Зависимость локальных коэффициентов теплоотдачи от числа  $Pe$  от времени работы стенда и режима (ЭДС ДАК соответствующая времени работы стенда представлено в табл. 2).

■ –  $l/d = 40$  (21 ч); □ –  $l/d = 30$  (21 ч); ▲ –  $l/d = 40$  (44 ч, эжектирование); △ –  $l/d = 30$  (44 ч, эжектирование); ○ –  $l/d = 30$  (47 ч); ● –  $l/d = 40$  (47 ч); ◆ –  $l/d = 40$  (68 ч); ◇ –  $l/d = 30$  (68 ч):

1 –  $Nu = 7 + 0.025Pe^{0.8}$ ; 2 –  $Nu = 5 + 0.025Pe^{0.8}$ ; 3 –  $Nu = 4.9 + 0.019Pe^{0.8}$ ; 4 –  $Nu = 4.2 + 0.019Pe^{0.8}$ ; 5 –  $Nu = 3 + 0.014Pe^{0.8}$

потоком свинец-литиевой эвтектики, наряду с ожидавшимся восстановлением оксидов свинца и очисткой от них теплоносителя и контура, могла приводить образованию гидрида лития и появлению отложений частиц этой примеси на стенке экспериментального участка, что могло вызвать ухудшение теплопередачи после завершения очистки теплоносителя и контура двухкомпонентным потоком ( $Li_{17}Pb_{83}$  – водород) локальные характеристики теплообмена существенно улучшились. Экспериментальные точки располагались, в основном, между кривыми  $Nu = 5 + 0.025Pe^{0.8}$  и  $Nu = 7 + 0.025Pe^{0.8}$ .

В режиме работы контура с прокачкой свинцалития через механический фильтр характеристики локального теплообмена ухудшились, вероятно, вследствие изменения состояния контура, вызванного выносом примесей в контур из отсеченных ранее участков трубопроводов. При этом, локальные значения теплоотдачи в сечении  $l/d=30$  располагались несколько выше кривой  $Nu = 4.2 + 0.019Pe^{0.8}$ , а значения теплоотдачи в сечении  $l/d=40$  – несколько ниже этой кривой. На рис. 3 виден, безусловно, положительный эффект, режима очистки теплоносителя и контура (двухкомпонентным потоком) на характеристики теплообмена. В процессе дальнейшей работы контура характеристики теплообмена стабилизируются, приближаясь к первоначальным – в начале испытаний, но, в среднем, несколько выше.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты показали влияние примеси кислорода на теплоотдачу к свинцу и эвтектике свинец-литий.

Снижение теплоотдачи можно объяснить изменением состояния приграничного слоя, а именно: изменением состояния газовых объемов; процессами адсорбции; процессами диффузии; образований веществ с плотностью меньшей плотности свинца.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТЖМТ – тяжелый жидкометаллический теплоноситель;  
ТЯР – термоядерный реактор,  
ЭУ – экспериментальный участок;  
ХА – хромель-алюмель;  
ЭДС – электродвижущая сила, мВ;  
 $Nu = ad/\lambda$  – число Нуссельта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громов Б.Ф., Субботин В.И., Тошинский Г.И. Применение расплавов эвтектики Pb-Bi и свинца в качестве теплоносителя ЯЭУ // Атомная энергия. 1992. Т. 73. Вып. 1. С. 19–24.
2. J.J. Sienicki, D.C. Wade et al. The STAR-LM Lead-Cooled Closed Fuel Cycle Fast Reactor with a Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle Advanced Power Converter // Сборник докладов конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». г. Обнинск, 2003.
3. 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, 2004.
4. Безнососов А.В., Семенов А.В., Давыдов Д.В., и др. Экспериментальное исследование теплоотдачи от круглой трубы к свинцовому теплоносителю при регулируемом содержании кислорода // Атомная энергия. 2004. Т. 95. Вып. 5.