УДК 621.039.553.36

И.К. ШАБЕЛЬНИК, студент гр.Р-С10 (ИАТЭ НИЯУ МИФИ)
Научный руководитель: Е.В. ВАРСЕЕВ, инженер (ИАТЭ НИЯУ МИФИ)
г. Обнинск

ТЕПЛООТДАЧА В КОНТУРАХ АЭС С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ ПРИ ПОВЫШЕННОМ СОДЕРЖАНИИ ПРИМЕСЕЙ

Массоперенос в контурах с жидкими металлами (ЖМ) заключается в переносе продуктов коррозии и других примесей из «горячего» места контура в «холодное», и может приводить к ряду негативных явлений. Одним из них является падение теплоотдачи в теплообменниках системы очистки теплоносителя. Это, в свою очередь, приводит к ухудшению КПД такой системы и усложняет ее эксплуатацию.

Причиной ухудшения теплоотдачи в контурах с ЖМ является так называемое контактное термическое сопротивление (КТС) [1-3]. На сегодняшний день считается, что основной причина КТС – отложения примесей на поверхности.

В работе показано, что теплоотдача жидкометаллического теплоносителя напрямую зависит от его чистоты. Также расчеты показали, что отложения оксида натрия, толщиной в один сантиметр могут привести к ухудшению теплоотвода от холодной ловушки на 40 %.

На заре развития технологии жидкометаллических теплоносителей возникли сомнения в эффективности теплопередающих способностей жидких металлов. Коэффициент теплоотдачи, полученный теоретически [4]:

$$Nu = 7 + 0{,}025 \cdot Pe^{0{,}8}; \qquad (1)$$

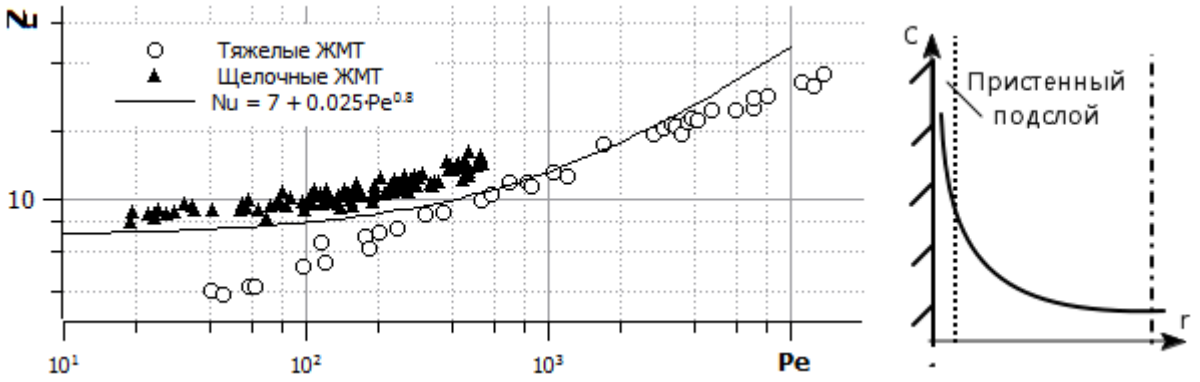
сильно отличался от получаемого на практике [5, 6]:

$$Nu = 5 + 0{,}025 \cdot Pe^{0{,}8}. \qquad (2)$$

Причем это справедливо как для щелочных ЖМ, так и для ТЖМТ. В связи с этим был проведен ряд экспериментальных работ, в результате которых было доказано, что коэффициент теплоотдачи, получаемый в опыте, сильно зависит от чистоты используемого ЖМ по содержанию примесей, в первую очередь – кислорода. В случае, когда содержание примесей в теплоносителе ограниченно на определенном уровне (для натрия – менее 10 млн$^{-1}$ [7], для ТЖМТ – около 0,01 млн$^{-1}$ [8]), она описывается выражением (2). В случае повышенной концентрации кислорода теплоотдача значительным образом снижается (см. рис.1а):

$$Nu = 3{,}3 + 0{,}014 \cdot Pe^{0{,}8}, \qquad (3)$$

Это подтверждается опытами по очистке натриевого теплоносителя от кислорода с концентрации 290 до менее чем 50 млн$^{-1}$, в которых коэффициент теплоотдачи увеличивался на 25-50 % [9].



а) б)

Рис. 1. Теплоотдача от щелочных и тяжелых ЖМТ по данным [1] (а) и распредление концентрации примесей по сечению канала с ЖМ (б)

Природа такого явления объясняется наличием отложений на теплообменных поверхностях. Эта причина указывается в большинстве литературных источников, однако детального объяснения такому явлению зачастую не приводится.

Другой возможной причиной КТС может быть ухудшение теплофизических свойств жидких металлов с примесью кислорода, без непосредственной кристаллизации последней. Так, многочисленные опыты по определению теплопроводности свинца показывают, что из-за наличия примеси кислорода в пробе получаемая теплопроводность может падать на 30 % [8].

Детальный сравнительный анализ литературных данных и опыты, проведенные в 2014 г. в НИЯУ МИФИ по оригинальной методике, позволили определить теплопроводность чистого свинца выражением (R^2 = ±0,45 Вт/м·К) [10]:

$$\lambda_{Pb} = 0{,}0127 \cdot T + 13{,}14 . \qquad (4)$$

Так как концентрация растворенного в ЖМ кислорода у стенки значительно больше, чем в ядре потока (см. рис. 1б), то наличие у теплоотдающей поверхности пристенного слоя ЖМ с пониженной теплопроводностью может служить препятствием в передаче тепла.

Наличие пристенного слоя в металле с повышенным содержанием примеси кислорода подтверждено экспериментами как для свинцового [2, 11], так и для щелочных ЖМ теплоносителей [9, 12].

Тепловой поток через стенку (слой отложений) определяется следующим образом:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta T$$

где q – тепловой поток, Вт/м^2; δ – толщина стенки, м; λ – теплопроводность стенки/отложений, Вт/м·К.

Для случая наличия отложений на поверхности ХЛ [13] были рассчитаны термические сопротивления для 1, 5, 10, 20 мм отложений оксида натрия. Результаты расчетов относительного теплового потока на стенку ХЛ с использованием термических сопротивлений, представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что снижение эффективности теплопередачи при наличии слоя отложений оксида натрия более 4 см близко к 60 %.

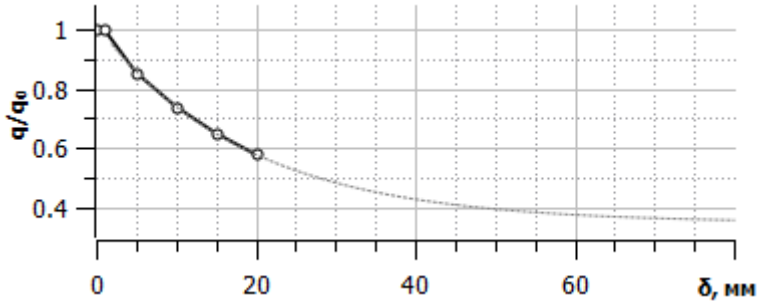


Рис. 2. Относительный тепловой поток от толщины слоя отложений на стенке холодной ловушки

Примечательно, что зависимость снижения теплоотдачи при увеличении слоя отложений с 10 до 50 мм очень близко к темпу снижения теплоотдачи в охлаждаемом канале с натрием при 80 и 450 млн$^{-1}$ [9].

Расчет КТС для случая наличия на поверхности канала со свинцом оксидной пленки, толщиной 50 мкм, слоя оксида на нем 50 мкм и пристенного слоя свинца с пониженным коэффициентом теплопроводности, был рассмотрен в работе [14].

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными [15], иллюстрирующие сотношение перепада температуры на оксидной пленке и слое отложений на стенке канала со свинцом представлено в табл. 1.

Таблица 1

Перепад температур в канале со свинцом, ˚С

	$\Delta T_{расч}$	$\Delta T_{эксп}$	$\Delta T_{общ, эксп}$
Оксидная пленка	1,7	5	10
Слой отложений	3,3	8	12
Подслой свинца	1,0	11	16

Обобщим из приведенного выше анализа возможные причины КТС:

1. Наличие слоя отложений на стенке теплообменной поверхности;

2. Наличие пристенного слоя ЖМ с повышенным содержанием примеси у стенки.

Примеси в ЖМ, вообще говоря, могут находиться как в растворенном, так и виде взвешенной дисперсной фазы частиц. Последнее возможно в случае, когда для образования частиц созданы термодинамические условия (например, для образования двойного оксида хрома в натрии $NaCr_2O_4$ должно быть обеспеченно достаточное количество кислорода и хрома в натрии при данной конкретной температуре) или примесь присутствует в растворе ЖМ в избытке и образуется его пересыщенный раствор.

Таким образом, природа первой причины КТС – кристаллизация примесей на охлаждаемой стенке и высаждения на ней взвешенной фазы.

Вопрос массопереноса примесей в натриевом контуре, учетом взвесеобразования и эволюции дисперсной фазы рассмотрен в [16]. Однако проблема влияние дисперсной фазы на теплоотдачу в натриевом контуре в литературе не затронута.

В качестве первого шага решении проблемы влияния дисперсной фазы на теплоотдачу рассмотрим следующую задачу: в неизотермическом канале прокачиваемый натрий подогревается с температуры 370°С до 550 °С. Определим количество частиц в единице объема натрия.

Так как примеси в натрии присутствуют в растворенном и взвешенном виде, то полное их количество в натрии соответствует сумме концентрации взвешенной фазы и растворенной. Поэтому количество примесей во взвешенном виде можно рассчитать следующим образом:

$$C_{взв} = C_{общ} - C_{раств} \qquad (5)$$

где: С – концентрация примеси, млн$^{-1}$.

Рассчитаем концентрацию взвешенных частиц в натриевом теплоносителе для основных металлических примесей: Fe, Cr и Ni. Для расчёта количества взвешенных частиц железа, никеля и хрома в единице объема натрия общая концентрация железа рассчитывалась как среднее арифметическое результатов химического анализа проб на содержание кислорода в натриевых контурах как экспериментальных, так и опытно демонстрационных установок. Для железа это значение составило 13,3 млн$^{-1}$, для хрома – 2,3 млн$^{-1}$, для никеля – 1,6 млн$^{-1}$. Были использованы температурные зависимости растворимости никеля, хрома и железа в натрии из [17]. Резульаты расчета содержания растворенных примесей никеля, хрома и железа в натрии и во взвешенном состоянии при различных температурах сведены в табл. 2.

Таблица 2

Содержание примесей металлов во взвешенном
и растворенном состоянии при различных температурах натрия

Me	$C_{Me.раств}$, млн$^{-1}$		$C_{Me.взв}$, млн$^{-1}$	
	370 ˚С	550 ˚С	370 °С	550 °С
Ni	0,425	1,453	1,152	0,123
Cr	0,0002	0,077	2,269	2,193
Fe	0,021	0,523	13,279	12,777

Исходя из того, что масса теплоносителя в первом контуре БН-600 составляет 900 т, найдем количество частиц примесей для никеля, хрома и железа по следующей формуле:

$$N = \frac{M}{m} = \frac{M_{Na} \cdot C_{взв}}{\rho_{Fe} \cdot V_{Me}};$$

где: M – масса всех частиц примесей, кг; m – масса одной частицы, кг; M_{Na} – масса натрия, кг; V_{Me} – объем частиц, м^3.

Исходные данные, использованные в расчетах:

- все частицы сферической формы и одинакового размера;
- средний радиус частиц примесей в натрии [18]: $r = 5 \cdot 10^{-6}$ м;
- плотности металлов: $\rho_{fe} = 7{,}8$ г/см^3; $\rho_{Ni} = 8{,}9$ г/м^3; $\rho_{Cr} = 7{,}19$ г/см^3.

Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Количество частиц примесей в 1 см^3 теплоносителя БН-600

	Fe	Ni	Cr
$N(T_1 = 550°C)$, см$^{-3}$	$2{,}64 \cdot 10^3$	$0{,}225 \cdot 10^2$	$4{,}950 \cdot 10^2$
$N(T_2 = 370°C)$, см$^{-3}$	$2{,}75 \cdot 10^3$	$2{,}099 \cdot 10^2$	$5{,}123 \cdot 10^2$
$N(T_2) - N(T_1)$, см$^{-3}$	$0{,}11 \cdot 10^3$	$1{,}874 \cdot 10^2$	$0{,}173 \cdot 10^2$
$\Delta N/N$, %	4,0	89,3	3,0

Из результатов, представленных в табл. 3 видно, что за счет разницы температуры в контуре, количество частиц железа и хрома в нем изменяется всего на 4% и 3% соответственно, а количество частиц никеля заметно уменьшается – на 89,3%.

В ходе нашей работы были проанализированы возможные причины появления КТС, которое негативно сказывается на свойствах теплоносителя и как следствие на всю установку в целом. Так же был произведен расчет количества примесей в 1 см^3 при прокачке теплоносителя через активную зону реактора БН-600. Для хрома и железа результат показал, что ко-

личество примесей этих элементов на всем участке практически одинаково. А частицы никеля напротив, при подогревании теплоносителя практически полностью переходят в растворенный вид.

В дальнейшем планируется получить распределение примесей по радиусу и длине канала, что возможно поможет решить некоторые проблемы с ухудшением теплоотдачи и выявить закономерности в поведении частиц.

Список литературы:

1. Ивановский М.Н., Субботин В.И., Орлов Ю.И. Термическое контактное сопротивление при охлаждении каналов жидкими металлами // Сб. трудов «М.Н. Ивановский. Технология высокотемпературных жидкометаллических теплоносителей и тепловых труб». Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2005. – С. 24-30.
2. Орлов Ю.И. Обобщение данных по теплообмену в среде жидкометаллических теплоносителей с учетом термического сопротивления в пристенных зонах. / Сб. «Исследования в области теплофизики ядерных энергетических установок. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2014. – 365 с.
3. Кириллов П.Л.. Роль термического контактного сопротивления в теплообмене жидких металлов // Сб. трудов конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях», Т. 2. – Обнинск, 1999. – с.636-642.
4. Lyon R. // Chem. Engeng. Progr. – 1951. – V.47. – N2. – P.75.
5. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллического теплоносителя. – М.: Атомиздат, 1970. – 293 с.
6. Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федынский О.С. Жидкометаллические теплоносители. – М.: Атомиздат, 1976.
7. Натрий реакторной чистоты для реакторов БН. Технические требования и методы контроля примесей: ОСТ 95 10582-2003: Стандарт отрасли, 2003.
8. Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies, OECD/NEA, Paris (2007), 691 p.
9. Андреев А.С., Федорович Е.Д., Щедрин А.В. Некоторые данные о влиянии примеси кислорода на теплоотдачу при течении натрия в охлаждаемой трубе. Сб. статей «Жидкие металлы». – М: Госатомиздат, 1963. – С. 109-113.
10. Круглов А.Б., Круглов В.Б., Стручалин П.Г., Харитонов В.С. Исследование теплопроводности свинца С1 импульсным методом в диапазоне температур 350-1000 °С: Сб. докл. конф. «Теплофизика-2014». М.: НИЯУ МИФИ, 2014.

11. Безносов А.В., Бокова Т.А., Махов К.А идр.. Экспериментальные исследования пристенного слоя: стенка конструкционного материала – свинцовый теплоноситель реактора на быстрых нейтронах. Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород: НГТУ, 2014. – С. 104-112.

12. Ивановский М.Н., Субботин В.И., Арнольдов М.Н., Ибрагимов М.Х., Номофилов Е.В. Теплоотдача при турбулентном течении металлов в трубах // Сб. трудов «М.Н. Ивановский. Технология высокотемпературных жидкометаллических теплоносителей и тепловых труб». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2005. – С. 31-37.

13. Варсеев Е.В., Алексеев В.В., Кондратьев А.С. Применение открытого CFD пакета для расчета тепломассообмена в прототипе холодной ловушки. / Сб. тез. конф. «ТФ-2013». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2013. – С. 295-298.

14. Варсеев Е.В., Алексеев В.В. Кинетика окисления сталей в ТЖМТ. Сб. тез. конф. МАЯТ-2014, Звенигород. – М: ВНИИНМ, 2014. – С. 112.

15. Безносов А.В., Новожилова О.О., Савинов С.Ю. Экспериментальные исследования процессов теплообмена и профилей температур потока тяжелого жидкометаллического теплоносителя / Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. –№3 – С. 80-90.

16. Алексеев В.В. Массоперенос трития и продуктов коррозии конструкционных материалов в контурах с натриевым теплоносителем. Диссертация … д.т.н. Обнинск: ГНЦ-РФ ФЭИ, 2002.

17. Варсеев Е.В., Алексеев В.В.. Обзор данных по растворимостям индивидуальных веществ в жидкометаллических теплоносителях. // Сб. тез. конф. «ТФ-2014». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2014. – С. 117-118.

18. Варсеев Е.В., Алексеев В.В. Исследование массопереноса продуктов коррозии в неизотермическом контуре с натрием // Иженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87. – № 6. – С. 1466-1471.