

Теплопроводность пристенного слоя потока жидкометаллических теплоносителей

М. Е. ИВАНОВСКИЙ, Ю. И. ОРЛОВ, В. И. СУББОТИН

УДК 621.039.517.

Коэффициент теплоотдачи от стенки к жидким металлам существенно (почти вдвое) снижается при наличии термического контактного сопротивления. Проведенный нами анализ влияния различных факторов на теплоотдачу и экспериментальное исследование распределения примесей в потоке лития показали, что в условиях нагрева теплоносителей основная причина контактного термического сопротивления — скопление теплопроводных нерастворенных примесей в пристенном слое потока. Влияние примесей на теплоотдачу исследовалось как в статических условиях, так и при турбулентном течении лития в трубах.

С помощью зонда с тремя микротермопарами в капиллярах (из нержавеющей стали наружным диаметром 0,5 мм), расположенными непосредственно у стенки и на расстояниях 3,75 и 6,25 мм от нее, были измерены поля температур в пристенном слое стабилизированного турбулентного потока лития в трубе внутреннего диаметром 90 мм. Опыты проводились как при отсутствии в жидком металле нерастворенных примесей, так и после загрязнения лития азотом, когда в контуре находились нерастворенные нитриды лития в диапазоне чисел $Pe = 200 \div 800$. Примеры полей температур в пристенной области потока показаны на рис. 1.

Поля температур, полученные в опытах с чистым металлом, согласуются с обобщенным полем температур, полученным в опытах с другими жидкими металлами. Если в потоке лития присутствуют взвешенные примеси нитрида лития, поля температуры в пристенной области, построенные по показаниям термопар зонда в термопар, заделанных в стенке, отличаются от полей, полученных при отсутствии примесей. Градиент температуры в пристенной области потока становится значительно круче.

Изменение поля температур при загрязнении жидкого металла показывает, что нерастворенные примеси скапливаются вблизи стенки и существенно уменьшают теплопроводность пристенного слоя потока.

Одновременно с измерениями полей температур в пристенной области потока на этой же трубе определялся средний коэффициент теплоотдачи. В опытах с чистым литием он соответствовал значениям, рассчитанным по формуле

$$Nu = 5 + 0,025 Pe^{0,8}, \quad (1)$$

аппроксимирующей результаты опытов с чистыми жидкими металлами и теоретических расчетов. Загрязнение лития взвешенными примесями нитрида приводит к снижению теплоотдачи вплоть до значений, описываемых формулой

$$Nu = 3 + 0,014 Pe^{0,8}, \quad (2)$$

Эта формула с точностью примерно $\pm 20\%$ обобщает данные по теплоотдаче, полученные в опытах с различными жидкими металлами, когда не принимались специальные меры по очистке и поддержанию чистоты теплоносителей, т. е. чистота металлов была невысокой и, безусловно, различной и неконтролирующейся.

В наших опытах с литием дальнейшее загрязнение теплоносителя нитридом вплоть до закупорки им контура не приводило к дальнейшему [что формально

следует из формулы (2)] снижению теплоотдачи; не происходило также и дальнейшего изменения пристенных полей температур. Это указывает на то, что пристенный слой примесей и соответствующее контактное сопротивление могут расти только до своего предельного значения, зависящего от критерия Рейнольдса.

Поля температур в пристенной области лития с различным содержанием примесей измерялись также в статических условиях.

С помощью подвижной микротермопары при вертикальном перемещении определялось поле температуры в стенке и неподвижном литии. В этом случае термопара перемещалась по пазу шириной 1,2 мм, прорезанному в дне стакана, заполненного литием (рис. 2). Для предотвращения утечек тепла по капилляру и термоэлектродам и связанной с этим погрешности в измерениях температур термопара имела горизонтальный участок длиной 6 мм, что составляет 12 диаметров капилляра и связанной с этим погрешности в измерениях температур термопара имела горизонтальный участок длиной 6 мм, что составляет 12 диаметров капилляра и связанной с этим погрешности в измерениях температур термопара имела горизонтальный участок длиной 6 мм, что составляет 12 диаметров термоэлектродов. Таким образом непосредственно определялся скачок температур на границе стенка — жидкость, обусловленный слоем нерастворенных примесей лития.

Поля температуры измерялись в отсутствие примесей при различном направлении теплового потока, при наличии нерастворенных примесей — при направлении теплового потока от стенки к литию, т. е. в условиях нагрева теплоносителя. Чтобы исключить влияние естественной конвекции, измерения проводились при небольших тепловых нагрузках ($3 \cdot 10^3 - 8 \cdot 10^3$ ккал/м²·ч).

Для получения нерастворенных примесей в камеру опытного участка вводился газообразный азот. После достижения концентрации, превышающей концентрацию насыщения при данной температуре, нераство-

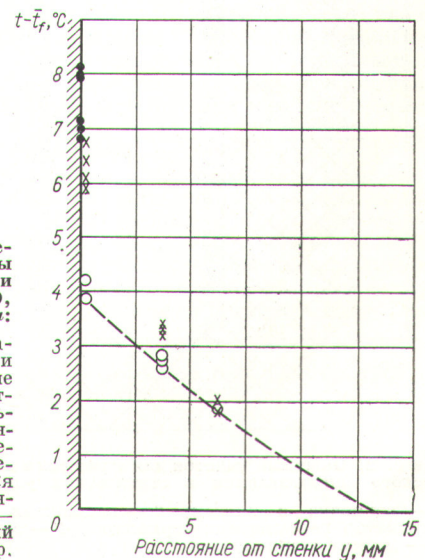


Рис. 1. Распределение температуры в пристенной области потока при $Pe = 200$, $q = 1500$ ккал/м²·ч:

○ — поле температур при отсутствии примесей; × — поле температур, соответствующее предельной величине контактного термического сопротивления; ● — показания термопары, заделанной в стенке; — — обобщенный температурный профиль.

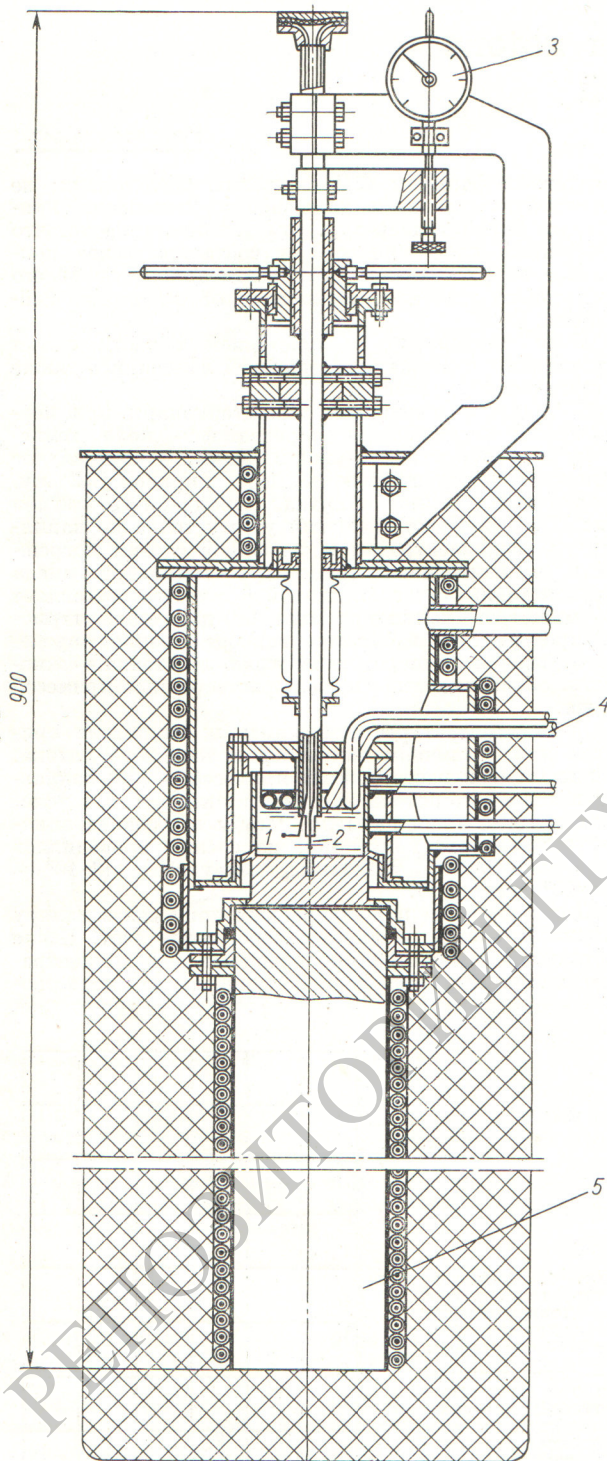


Рис. 2. Опытный участок для измерения контактного термического сопротивления в статических условиях:

1 — ванночка с литием; 2 — подвижная термопара; 3 — индикатор перемещения термопары; 4 — змевики с литием; 5 — медный теплопровод.

ренные частицы нитрида лития осаждались на поверхности теплообмена. В зависимости от количества введенного азота на теплообменной поверхности образовывался слой нерастворенных нитридов различной толщины.

На рис. 3, а приведено поле температур, измеренное после ввода азота в рабочий участок. На рис. 3, б для сравнения показано поле температур в чистом литии. Как и в потоке лития, в статических условиях скопление нерастворенных примесей вблизи поверхности теплообмена снижает теплопроводность пристенного слоя теплоносителя. Это приводит к снижению теплопередачи, появлению так называемого контактного термического сопротивления.

Была определена теплопроводность лития, содержащего большое количество нерастворенных примесей, концентрация которых примерно соответствовала концентрации в пристенном слое потока. Один из опытных участков, на которых проводились измерения, показан на рис. 4. Участки представляли собой трубки из стали 1X18H9T длиной 100 и 140 мм, наружным диаметром 12 мм и с толщиной стенки 0,3 мм. В верхней части трубка приваривалась к загрузочному бачку, а нижней частью — к цилиндрическому стержню из стали 1X18H9T.

Уровень температуры и тепловой поток регулировались путем изменения мощности электрической печи, которая надевалась на верхний бак, и электрического нагревателя, намотанного на нижний цилиндрический стержень. Тепловой поток был направлен от бачка к стержню. Утечки тепла с боковой поверхности контролировались тепломером и компенсировались специальными нагревателями.

Температурное поле по длине трубки и стержня измерялось двенадцатью хромель-алюмелевыми термопарами с диаметром термоэлектродов 0,3 мм. Термо-

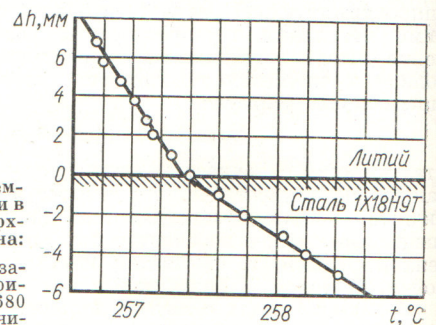
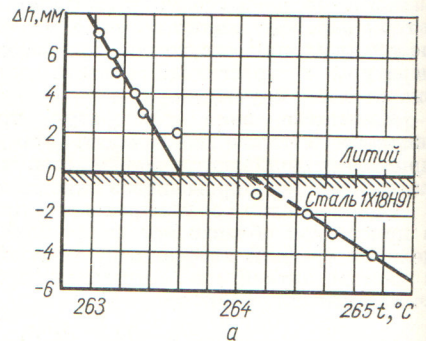
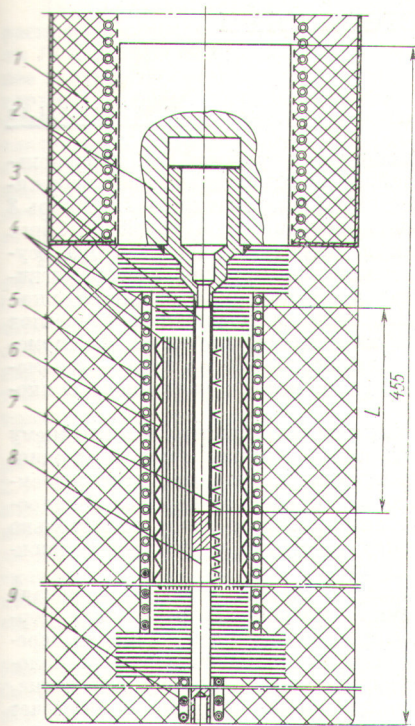


Рис. 3. Поля температур в стенке и в литии вблизи поверхности теплообмена:

а — в литии, загрязненном нитридами ($q = 3680$ ккал/м²·ч); $\sigma =$ в чистом литии ($q = 3230$ ккал/м²·ч).



Р и с. 4. Опытный участок для измерения теплопроводности лития с большим содержанием азота:

- 1 — электрод; 2 — бачок; 3 — опытная трубка; 4 — тепловые экраны; 5 — компенсационный нагреватель; 6 — термомер; 7 — термопары; 8 — цилиндрический стержень; 9 — нагреватель.

пары приваривались к стенке. Тепловой поток рассчитывался по градиенту температуры в стержне из стали 1X18H9T.

Содержание азота в литии в первом опыте, по данным химических анализов, составляло 17—20 вес.%. Теплопроводность такой смеси оказалась равной ~12 ккал/м·ч·°С. В другом опыте измерялась теплопроводность смеси нитрида лития и лития, взятой с внутренней стенки вертикальной трубки контура после слива лития. Концентрация азота в такой смеси после расплавления и полного заполнения литием пор между частицами нитрида составляла 22—29 вес.% N₂ или 70 вес.% нитрида. Отсутствие газовых пор проверялось после измерений при препарировании участка. Теплопроводность такой смеси составляла 6—8 ккал/м·ч·°С при температуре 300°С. Теплопроводность чистого лития при этой же температуре равна 40 ккал/м·ч·°С. Эти данные подтверждают возможность значительного снижения теплопроводности пристенного слоя потока (как следует из рис. 1) при концентрировании в нем нерастворенных примесей.

Приведенные выше данные по полям температур и теплоотдаче, а также результаты наших измерений распределения взвешенных примесей по сечению турбулентного потока в трубе позволяют приблизительно представить механизм контактного термического сопротивления.

Примеси образуют на стенке слой δ_k с объемной концентрацией C_0 порядка единицы и переходный слой с переменной концентрацией. В турбулентном ядре потока концентрация взвешенных примесей постоянна и равна C (по нашим измерениям составляет порядка $10^{-4} C_0$).

Решение дифференциального уравнения материального баланса примесей на единицу поверхности пристенного слоя дает предельное значение толщины этого слоя, не зависящей от концентрации взвеси в потоке, но зависящей от скорости потока (критерий Re):

$$\delta_k = \left(\frac{b}{kD} \cdot \frac{d}{Pr_D^{0,25} \cdot Re^{0,9}} \right)^{1/n}, \quad (3)$$

где b, k — постоянные величины; D — коэффициент диффузии взвешенных частиц; $Pr_D = \frac{\nu}{D}$ — диффузионное число Прандтля ($n < 3$).

В случае, когда количество нерастворенных примесей в контуре недостаточно, чтобы образовать контактный слой предельной толщины при данном значении числа Re , толщина слоя и контактное термическое сопротивление будут зависеть от общего количества примесей на данном участке контура.

Предельный характер толщины пристенного слоя примесей объясняет и предельный характер формулы (2), полученной для загрязненных жидких металлов.

Тот факт, что эта формула приближенно обобщает опытные данные для различных металлов с различной теплопроводностью, и то, что предельная толщина слоя примесей δ_k определяется в основном гидродинамическими и геометрическими характеристиками канала, указывает на примерно одинаковое отношение теплопроводностей жидкометаллического теплоносителя и пристенного слоя примесей для различных теплоносителей. Это может быть объяснено тем, что теплопроводность частиц примеси мала по сравнению с теплопроводностью жидкого металла, заполняющего промежутки между частицами; поэтому теплопроводность слоя примесей определяется его пористостью и теплопроводностью металла, заполняющего поры между частицами примеси.

Если частицы примеси располагаются в упаковках, имеющих в среднем близкую пористость, то указанное отношение теплопроводностей будет одинаковым для различных жидкометаллических теплоносителей.

Понятно, что предполагаемая модель контактного термического сопротивления справедлива только при условии нагревания жидких металлов, когда нет кристаллизации на стенке.

Поступило в Редакцию 23/VII 1966 г.