



Теплоотдача в трубе к сплаву натрия с калием и к ртути

П. Л. Кириллов, В. И. Субботин, М. Я. Суворов, М. Ф. Троянов

Имеющиеся экспериментальные данные по теплоотдаче к жидким металлам часто не совпадают между собой, а также с теоретическими данными. Причины таких расхождений до сих пор были неясны. Из настоящей работы можно сделать вывод, что основной причиной расхождения является термическое сопротивление, возникающее на границе теплоотдающей поверхности и жидкого металла. К такому заключению пришли после измерения коэффициента теплоотдачи к жидкому металлу двумя методами: измерением распределения температур в потоке жидкости и измерением температуры стенки. Распределение температур в потоке совпало с распределением, рассчитанным по уравнению Лайона. Было обнаружено, что загрязнение сплава натрий—калий кислородом приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи. Результаты опытов, проведенных при отсутствии контактного термического сопротивления на границе стенки с жидким металлом, совпадают с результатами работ Исакова и Дрю, а также Брауна, Амстеда и Шорта.

В настоящей статье описывается экспериментальная установка, опытный участок и термопара, с помощью которой было измерено распределение температур в потоке жидкого металла.

Значения коэффициента теплоотдачи к жидким металлам, полученные экспериментальным путем, обычно на 30—40% ниже коэффициента, рассчитанного по уравнению Мартинелли—Лайона [1].

Из обзоров об экспериментальных работах [2, 3] видно, что условия, на которых основаны теоретические расчеты, в значительной мере не выполнялись. Авторы настоящей работы решили получить значение коэффициента теплоотдачи к жидким металлам при возможно более полном соблюдении условий теоретического расчета: 1) установившегося поля скоростей; 2) установившегося поля температур; 3) отсутствия концевых эффектов; 4) небольшой величины продольных градиентов температуры по сравнению с радиальными; 5) независимости свойств жидкости от температуры; 6) отсутствия контактного термического сопротивления на границе твердого и жидкого металлов.

Была выбрана методика, позволяющая вычислить коэффициент теплоотдачи двумя способами: из измерений распределения тем-

ператур в потоке жидкости и из измерений температуры стенки. Первая попытка использовать одновременно эти два способа была сделана Исаковым и Дрю [4]. Однако она не дала положительных результатов.

Авторы настоящей статьи провели опыты с эвтектическим сплавом натрий—калий и со ртутью. Схема установки для изучения теплоотдачи к сплаву натрий — калий показана на рис. 1. Все оборудование установки, за исключением трубы экспериментального участка, было изготовлено из нержавеющей стали марки IX18N9T. Циркуляция сплава осуществлялась электромагнитным насосом. В контуре был установлен мерный бак для проверки объемным способом правильности показаний электромагнитных расходомеров, холодная ловушка для очистки сплава от окислов и прибор, определяющий содержание кислорода в сплаве. Аналогичное оборудование было использовано при проведении опытов по теплоотдаче к ртути и при контрольных опытах с водой. Экспериментальные участки изготавливались из медных и никелевых труб. Основные размеры этих труб при-

Характеристики экспериментальных участков

Параметры участка	Номер экспериментального участка				
	1	2	3	4	5
Внутренний диаметр трубы, мм . . .	22,44	40,0	40,0	36,7	36,7
Толщина стенки, мм	7,25	5,0	5,0	3,95	3,95
Полная длина, мм	2300	2200	2200	2200	2200
Длина нагреваемого участка, мм . .	960	1120	1120	1100	1100
Относительная длина нагреваемого участка, l/d	39,2	28	28	30	30
Количество термопар в стенке, шт. .	12	24	12	15	12
Материал трубы	Медь	Медь	Медь	Никель	Никель
Жидкий металл	NaK	NaK	NaK	NaK, Hg	NaK

ведены в таблице. Схема участка показана на рис. 2. Основная труба присоединялась на фланцах к нижней и верхней камерам.

риментальной трубы. На крышке верхней камеры был укреплен механизм передвижной термопары. В стенке экспериментальной

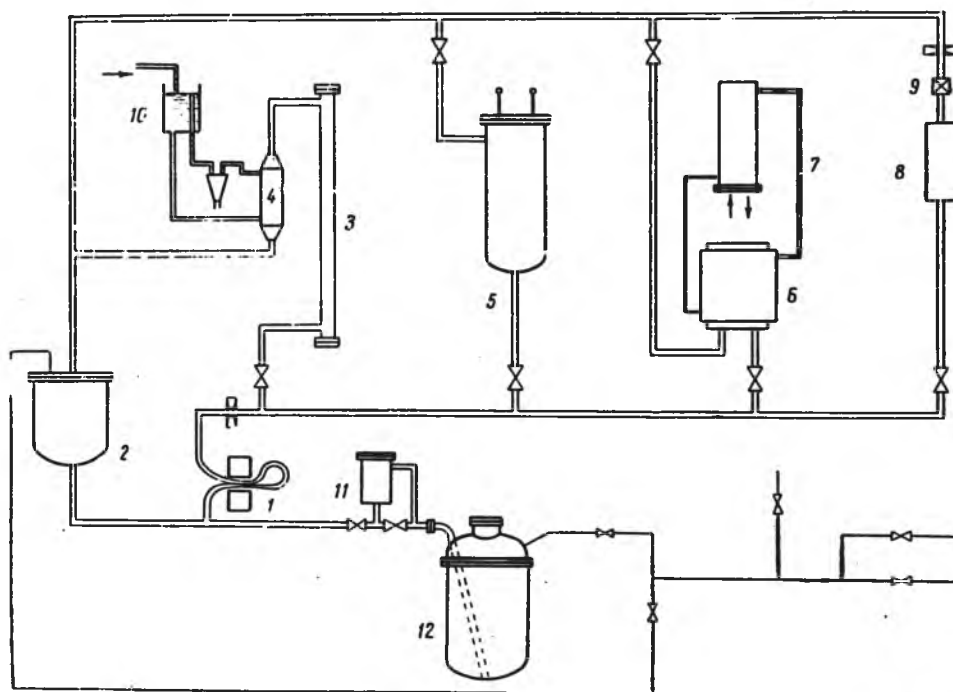


Рис. 1. Схема установки для изучения теплоотдачи к сплаву натрия-калий:

1—электромагнитный насос; 2—бак насоса; 3—экспериментальный участок; 4—холодильник; 5—мерный бак; 6—холодная ловушка; 7—конденсатор паров толуола; 8—холодильник индикатора окислов; 9—индикатор окислов; 10—бак постоянного уровня воды; 11—сетчатый фильтр; 12—сливной бак.

Сбоку к камерам были приварены патрубки для размещения карманов термопар и для подвода и отвода жидкого металла. Верхняя камера вставлялась в выточенный паз экспе-

трубы были выфрезерованы продольные канавки глубиной 3 мм, в которых укладывались термопары. Горячие спая термопар зачеканивались клиньями из того же мате-

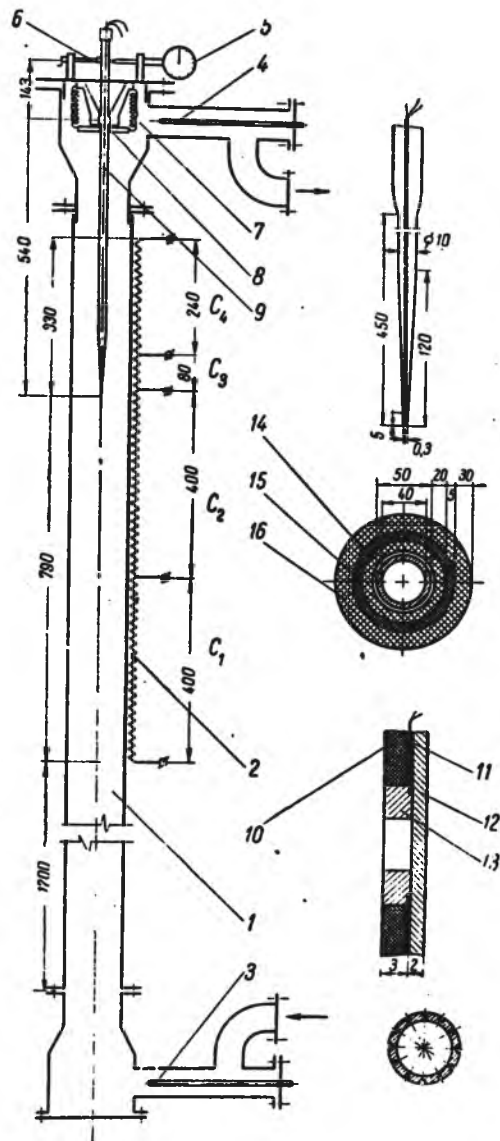


Рис. 2. Схема экспериментального участка и передвижной термопары (размеры в миллиметрах): 1—труба; 2—нагреватель; 3—термопара, измеряющая температуру жидкого металла на входе; 4—термопара, измеряющая температуру жидкого металла на выходе; 5—индикатор перемещения передвижной термопары; 6—винт, перемещающий термопару; 7—сильфон; 8—шарнир; 9—передвижная термопара; 10—слой окиси алюминия; 11—термопара в стенке трубы; 12—стенка трубы; 13—клин для зачеканки термопары; 14—внутренний слой тепловой изоляции; 15—тепломеры; 16—наружный слой тепловой изоляции.

риала, что и стенка. Для того чтобы исключить влияние материала проводов термопар на результаты измерений, на участках использовались термопары из различных материалов. На участке 1 одним термоэлектродом служил константан, другим — медная труба рабочего участка. На участках 2 и 5 использовались нихром-константановые и медь-константановые термопары, на участке 4—нихром-константановые и хромель-алюмелевые.

Трижды проведенная проверка градуировки нихром-константановых термопар показала, что характеристики термопар не изменились после того, как их выдержали в течение 1500 ч при температуре, превышающей рабочую на 100°C . Нагреватель из нихромовой проволоки диаметром 3 мм укладывался на слой миканита толщиной 0,5 мм с шагом 4 мм.

Для проведения опытов по изучению концевых эффектов и для определения длины участка тепловой стабилизации нагреватель на одном участке разделили на 4 секции. Нижняя часть экспериментальной трубы длиной 1200 мм представляла собой участок гидравлической стабилизации. Поскольку длина этого участка в 30 раз больше диаметра трубы, то профиль скоростей на входе в нагревательную секцию был установившимся. Тепловые потери от нагревательного участка измерялись четырьмя тепломерами. Измерения электродвижущих сил термопар производились на потенциометре ППТН-1 первого класса в комплекте с зеркальным гальванометром М-21/4. Электрическая мощность, потребляемая нагревателем, измерялась комплектом приборов класса 0,5.

Для измерения распределения температур в потоке жидкого металла на участках 3 и 5 устанавливалась передвижная термопара (рис. 3). Термопарный зонд 1 вводился с верхнего конца трубы. Перемещение термопары осуществлялось поворотом чехла термопары в шарнире 3, ось которого была перпендикулярна оси трубы экспериментального участка. Шарнирное соединение защищалось от жидкого металла сильфоном 4. Измерение перемещений производилось индикаторами 6 и 7 с ценой деления 0,01 мм. Отношение длины верхнего плеча к нижнему было около $1/4$. Конец термопарного зонда имел вид конуса с диаметром на тонком конце 1 мм. Толщина спая термопары 0,3 мм. Сборку термопары проверяли

многократными специальными измерениями, при которых перемещения конца термопары сопоставляли с показаниями индикатора. Симметрия измеренных распределений температуры относительно оси трубы также подтверждала правильность положения спая термопары. На участке 5 проверка положения спая термопары проводилась дополнительно с помощью перископа РВП-457.

Перед началом серии опытов или после перерыва в работе в течение 10—12 ч проводилась фильтрация сплава натрия — калий через холодную ловушку. Специальными опытами было установлено, что холодная ловушка окислов может снизить содержание кислорода в контуре до 0,003 вес. %. После фильтрации задавались определенный расход сплава через участок и мощность нагревателя. По достижении установившегося режима производили измерения температур стенки, распределения температур в жидком металле, температур металла на входе и выходе, расхода мощности, подводимой к нагревателю, потерь тепла на участке гидродинамической стабилизации и потерь тепла на нагреваемом участке. Порядок проведения опытов со ртутью и с водой был аналогичным, за исключением фильтрации теплоносителя через холодную ловушку. Коэффициент теплоотдачи рассчитывался по обычной формуле:

$$\alpha = \frac{q}{t_w - t_f} \quad (1)$$

Величина $t_w - t_f$ определялась двумя способами:

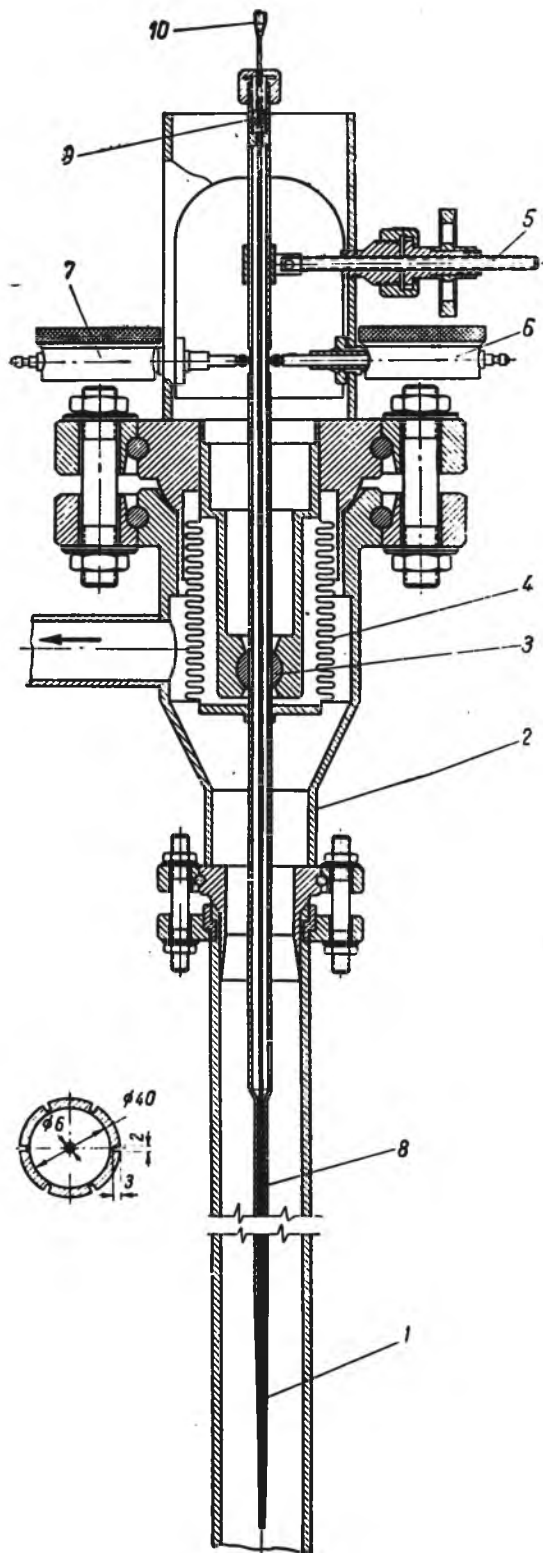
1) из графика распределения температур стенки и жидкости вдоль рабочего участка в стабилизированной зоне теплообмена;

2) из графика распределения температуры поперек потока. В последнем случае величина t_w находилась экстраполяцией. Правильность экстраполяции проверялась по граничному условию:

$$\left. \frac{dt}{dR} \right|_{R=R_0} = \frac{q}{\lambda} \Big|_{R=R_0} \quad (2)$$

Рис. 3. Конструкция передвижной термопары (размеры в миллиметрах):

1—термопарный зонд; 2—корпус верхней наемры; 3—шарнир; 4—сильфон; 5—тяговый винт; 6, 7—индикаторы; 8—защитный чехол термопары; 9—сальник; 10—вывод термоэлектродов из капилляра.



Средняя температура жидкого металла определялась по формуле:

$$t_f = \frac{\int_0^1 t \frac{W}{\bar{W}} dZ}{\int_0^1 \frac{W}{\bar{W}} dZ}, \quad (3)$$

где $Z = 1 - \left(\frac{R}{R_0}\right)^2$, а распределение скоро-

в опытах из измерений температур стенки, сначала были более низкими, чем в последующее время, и постепенно приближались к рассчитанным по уравнению

$$Nu = 7 + 0,025 (zPe)^{0,8}. \quad (6)$$

Изменение Nu/Nu_0 со временем для двух первых серий опытов показано на рис. 4, из которого видно, что стабильные значения коэффициентов теплоотдачи достигаются в этих опытах через 850—900 ч (при сред-

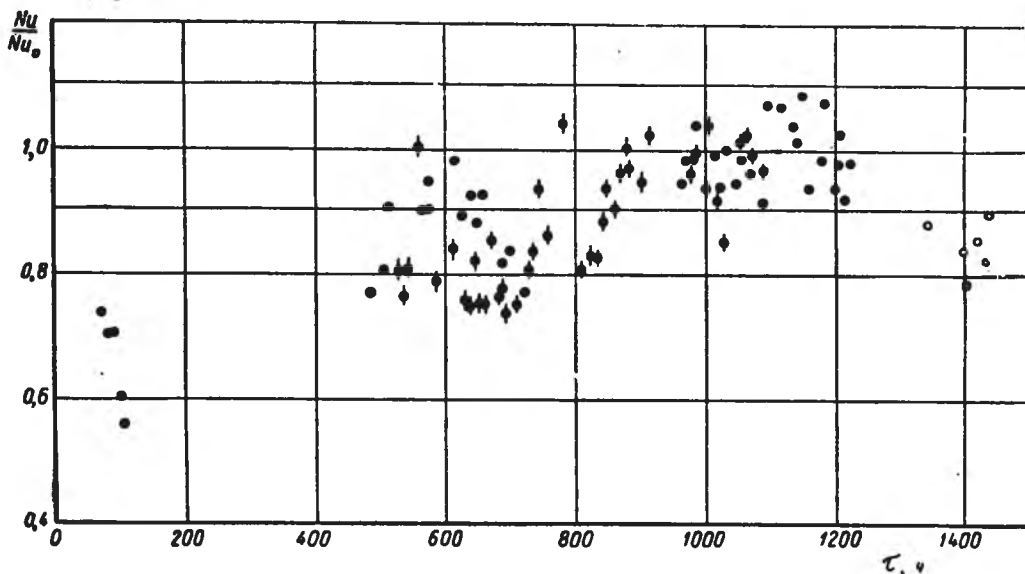


Рис. 4. Изменение коэффициентов теплоотдачи к сплаву натрий—калий со временем: Nu —значение числа Нуссельта, полученное в опытах из измерений температур стенки; Nu_0 —значение числа Нуссельта, рассчитанное по формуле (6); ●—первая серия опытов; ●—вторая серия опытов; ○—окисленная поверхность.

стей принималось по степенному закону, как в работе [4].

$$\frac{W}{\bar{W}} = \frac{(2+a)(1+a)}{2} \left(1 - \frac{R}{R_0}\right)^a, \quad (4)$$

где $a = f(Re)$.

Величина термического сопротивления на границе стенки с жидким металлом находилась из выражения

$$r = \frac{1}{\alpha_0} - \frac{1}{\alpha}. \quad (5)$$

Опытные данные были обработаны также в критериях подобия

$$Nu = f(Re).$$

Было проведено пять серий опытов. Коэффициенты теплоотдачи, полученные

ней температуре жидкости 150—200° С). При этом содержание кислорода в сплаве поддерживалось на уровне 0,003 вес. %.

В третьей серии опытов стабильные значения коэффициентов теплоотдачи были получены после 500—550 ч работы. Результаты вычислений контактного термического сопротивления для третьей серии опытов показаны на рис. 5. Из графика видно, что контактное термическое сопротивление в начальный период чрезвычайно неустойчиво и изменяется во времени бессистемно. Примерно через 550 ч оно снизилось до ничтожно малой величины и оставалось таким во все последующее время работы. Экспериментально измеренные распределения температур в шести опытах со сплавом натрий—калий показаны на рис. 6. Из рисунка видно,

что они весьма удовлетворительно совпадают с распределениями температур, рассчитанными по формуле (6), при $\varepsilon = 1$.

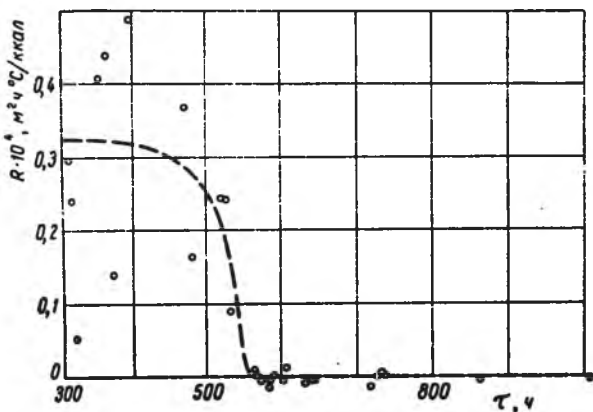


Рис. 5. Изменение контактного термического сопротивления со временем в третьей серии опытов.

Четвертая серия опытов была проведена со ртутью в никелевой трубе. По-видимому,

из-за наличия некоторого взаимодействия никеля со ртутью термическое сопротивление на границе отсутствовало и результаты эксперимента подтвердили уравнение (6). Опыты со сплавом натрия — калий в никелевой трубе в течение 530 ч (пятая серия опытов) показали, что в этом случае на границе трубы со сплавом имеется термическое сопротивление, которое и является причиной низких коэффициентов теплоотдачи, хорошо описываемых формулами, предложенными в работах [7, 8]. Коэффициенты теплоотдачи, полученные из измерения распределения температур в потоке, совпали с рассчитанными по уравнению (6). Было проведено несколько серий опытов по изучению влияния окислов на теплоотдачу к жидкому металлу в медной трубе. Эти опыты показали, что после очистки сплава фильтрацией коэффициенты теплоотдачи повышаются. Качественная и количественная зависимости коэффициента теплоотдачи от содержания кислорода показаны соответственно на рис. 7, а и б.

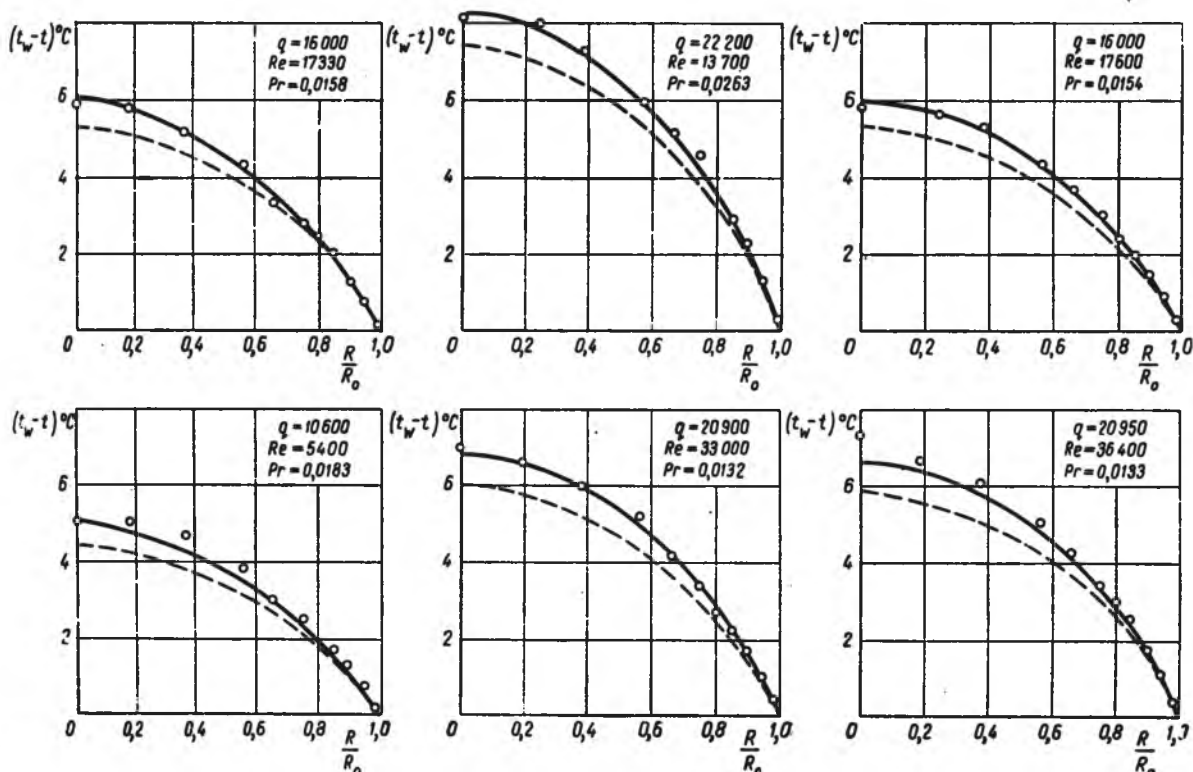


Рис. 6. Сравнение распределений температур, полученных экспериментальным и теоретическим путем в опытах со сплавом натрия — калий:

○ — экспериментальные точки; — — — — расчет по формуле Мартинелли; — — — — расчет по формуле Лайона.

Определения длины участка тепловой стабилизации для гидравлически установившегося потока жидкости показали, что этот участок равен 8—10 относительным диаметрам. Это подтверждает также распределение температур, измеренное на расстоянии

мулой, приведенной в работе [10]:

$$Nu_f = 0,021 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad (7)$$

На рис. 9 приведено сопоставление опытных результатов, полученных авторами данной статьи в координатах $Nu = f(Re)$, с результатами опытов Исакова и Дрю [4], Брауна, Амстеда и Шорта [5]. Причем, результаты работ [4, 5] перед сопоставлением были пересчитаны на новые значения теплопроводности ртути [6]. На график нанесены кривые,

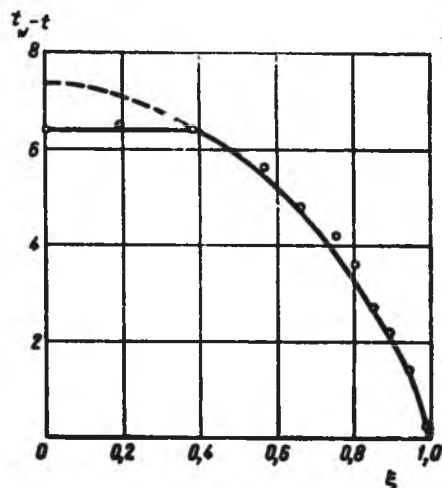


Рис. 8. Распределение температур по радиусу ($\xi = \frac{R}{R_0}$) в потоке сплава натрий—калий на расстоянии $9,75d$ от начала нагреваемого участка.

Рис. 7. Влияние окислов на коэффициент теплоотдачи в сплаве натрий—калий:

а) А—очистка сплава фильтрацией, В—добавление сплава, загрязненного окислами; б) зависимость коэффициента теплоотдачи от содержания кислорода в сплаве.

$9,75d$ от начала нагреваемого участка (рис. 8). Незаполненность профиля температур в самом центре потока не оказывает существенного влияния на вычисление средней температуры жидкости.

Специальными опытами было показано, что аксиальные потоки тепла по стенке и жидкому металлу не могут привести к значительным ошибкам. Детальным анализом установлено, что в большинстве опытов предельная относительная ошибка однократного определения коэффициента теплоотдачи не превышает 11%. Для проверки правильности способа измерений на участках 1, 3, 4, 5 проводились опыты с водой; все они дали вполне удовлетворительное совпадение с фор-

построенные по формуле (5) и соответствующие трем значениям величины ε (0,8; 1,0; 1,2). Из графика видно, что большинство точек хорошо совпадает и располагается в области, где ε изменяется от 0,8 до 1,2.

Экспериментальные исследования по теплоотдаче к жидким металлам, проведенные без тщательной очистки теплоносителя, дали более низкие значения коэффициентов теплоотдачи [2, 3, 7, 8, 9]. Нижняя граница имеющихся данных описывается формулой:

$$Nu = 3 + 0,014 Pe^{0,8}.$$

Верхняя граница при $\varepsilon = 1$ определяется по формуле (6).

На основе всего изложенного можно заключить, что причиной расхождения значений коэффициентов является термическое

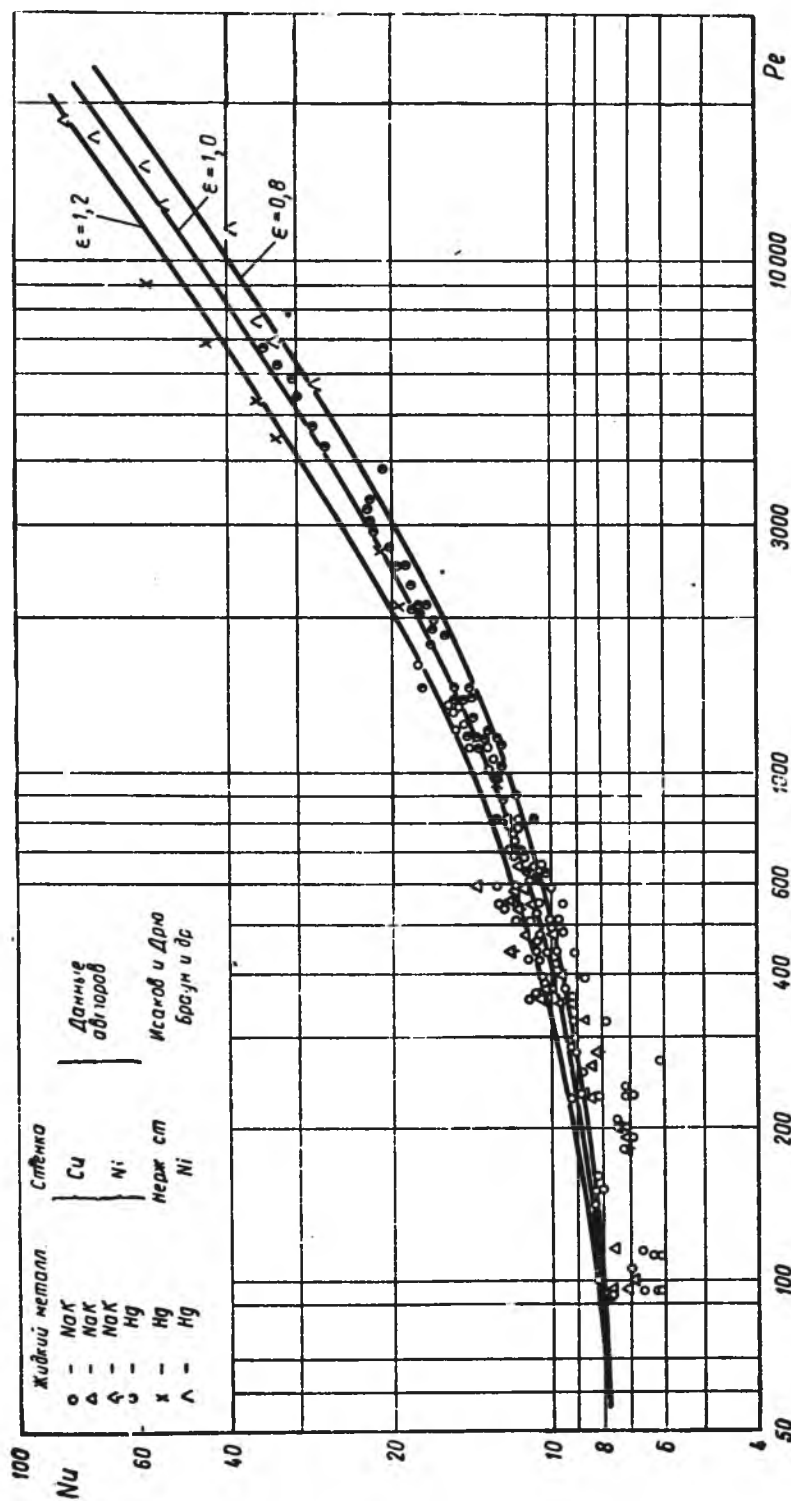


Рис. 9. Сопоставление результатов разных исследований по теплоотдаче в трубе при отсутствии термического контактного сопротивления.

сопротивление, возникающее на границе теплоотдающей поверхности и жидкого металла. На величину этого термического сопротивления в случае контакта меди со сплавом натрия — калий большое влияние оказывает загрязненность окислами металла теплоносителя и теплоотдающей поверхности. Поэтому результаты экспериментов с жидкими металлами, в которых содержание примесей не контролируется, иногда сильно расходятся. Сопоставление данных по теплоотдаче, полученных на жидких металлах и разных поверхностях, следует проводить с осторожностью.

Выводы

1. Результаты опытов по измерению коэффициента теплоотдачи к сплаву натрия — калий, полученные двумя методами (из измерений температуры стенки и распределения температур в потоке), позволили установить, что контактное термическое сопротивление существует и изменяется со временем. На величину контактного термического сопро-

тивления влияет содержание кислорода в сплаве.

2. Результаты опытов по измерению коэффициента теплоотдачи в никелевой трубе к ртути показали отсутствие контактного термического сопротивления. Таким образом, материал поверхности оказывает влияние на теплоотдачу.

3. Применение передвижной термопары позволило установить, что в опытах отсутствует влияние концевых эффектов, а длина участка тепловой стабилизации для гидравлически стабилизированного потока составляет 10 l/d .

4. Результаты опытов настоящей работы в случае отсутствия контактного термического сопротивления хорошо совпадают с результатами других работ [4, 5]. Следовательно, коэффициент теплоотдачи при отсутствии контактного термического сопротивления на стенке определяется уравнением

$$Nu = 7 + 0,025 (zPe)^{0,8},$$

где $z \approx 1$.

Поступила в Редакцию 25/VI 1958 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Lyon. Chem. Engng. Progr., 47, 25 (1951).
2. B. Lubarsky, S. J. Kaufmann. NACA Report, 1270, 1956.
3. С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский, И. И. Новиков, О. С. Федынский. Жидкометаллические теплоносители. М., Атомиздат (1958).
4. S. E. Isakoff, T. B. Drew. General discussion on heat transfer, London Conference, 405, 1951.
5. H. E. Brown, B. H. Amstead, B. E. Short. Transactions of the ASME, 79, 279 (1957).
6. В. А. Вельтищева, Н. А. Калакуцкая, Н. А. Никольский. Теплоэнергетика, № 10, 80 (1958).
7. М. А. Михеев, В. А. Баум, К. Д. Воскресенский, О. С. Федынский. Реакторостроение и теория реакторов. Изд-во АН СССР, 1955.
8. И. И. Новиков, А. Н. Соловьев, Е. М. Хабахпашева и др. Атомная энергия, № 4, 92 (1956).
9. В. М. Боришанский, С. С. Кутателадзе. Ж. техн. физ., 28, 4, 836 (1958).
10. М. А. Михеев. Изв. АН СССР, ОТН, № 10, 1448 (1952).

