

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АО «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ –
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А.И. Лейпунского»

ФЭИ – 3275

П. Л. Кириллов

Банк данных по теплообмену в жидких металлах

**Часть 1. Распределение температуры в круглых трубах
при течении однофазных потоков металлов**

Обнинск 2017

УДК 536.24

Кириллов П.Л.

Банк данных по теплообмену в жидких металлах.

Часть 1. Распределение температуры в круглых трубах при течении металлов.

ФЭИ – 3275. Обнинск: ФЭИ, 2017. – 18 с.

Создание корректных методик расчетов теплообмена при вынужденных течениях в каналах, требует знаний о распределении температуры в пристенных слоях потока.

Для обычных жидкостей (газы, вода), где числа Прандтля $Pr \approx 1$ такие измерения весьма трудны из-за малых толщин пограничного слоя. Задача упрощается для случая жидких металлов, у которых $Pr \ll 1$.

В препринте содержится форма представленных первичных данных, а также ссылки на 37 опубликованных российских и зарубежных работ (Hg – 12, NaK – 9, Na – 4, Li – 4, PbBi – 8). Первичные данные находятся в электронном виде.

ВВЕДЕНИЕ

Особенность жидких металлов, обладающих более высокой теплопроводностью по сравнению с обычными жидкостями и как следствие этого низкими числами Прандтля, состоит в том, что даже при развитом турбулентном течении молекулярной (электронной) перенос тепла играет важную роль не только в пристенном слое, но и в турбулентном ядре потока. Это приводит к тому, что коэффициенты теплообмена в жидких металлах выше, чем в обычных жидкостях при той же мощности на перекачку. Поэтому использование жидких металлов особенно привлекательно в высоконапряженных теплообменных устройствах и, в частности, в ядерной технике. Толщина теплового пограничного слоя для жидких металлов оказывается значительно большей, чем толщина гидродинамического пограничного слоя, что позволяет легче и точнее получить профиль температуры в пристенном слое и по сечению трубы.

Теория подобия указывает, что зависимости для расчета теплообмена в жидких металлах имеют вид $Nu = F(Re)$. Эта функция зависит не только от формы канала, но и от чистоты металла. На границе стенки с жидким металлом может присутствовать слой, вызывающий дополнительное термическое сопротивление теплоотдаче (R_k). Причинами этого термического сопротивления могут быть: а) окисные или интерметаллические пленки на теплоотдающей поверхности, которые могут либо исчезать, либо образовываться во время работы; б) осаждение примесей из потока металла при охлаждении последнего и образование неподвижного слоя примесей (в этом случае R_k не зависит от скорости, и предсказать его величину не представляется возможным); в) образование подвижного слоя примесей в случае нагрева металла.

Свойства жидких металлов слабо зависят от температуры; перепады температуры в потоке обычно невелики. Как следствие при расчетах теплоотдачи жидких металлов в большинстве случаев снимается необходимость учитывать неизотермичность потока.

Представленные в банке данные могут использоваться при выработке рекомендаций и разработки соответствующих методик и для потоков в некруглых каналах.

1. Сводная таблица

Таблица 1. Сводные данные по измерениям полей температуры в потоках жидких металлов*

Жидкий металл	Материалы поверхности	$Re \cdot 10^{-3}$	$Pr \cdot 10^2$	Количество опытов	Примечание (область применения)
Ртуть	Нерж. сталь, ст.20, никель	$17 \div 731$	1–2	> 100	Моделирующая среда
Сплав Na-K эвтектика 22/78	Медь, никель, нерж. сталь	$4 \div 300$	0,6–2	282	Космические системы
Натрий	Медь, никель, сталь 3, нерж. сталь	$2,5 \div 180$	0,4–1	170	Быстрые реакторы
Литий	Нерж. сталь	$4 \div 190$	2–5	60	Космические системы
Сплав Pb-Bi эвтектика	Нерж. сталь	$10 \div 260$	1–3	130	Судовые установки
Свинец	Спец. стали		1–2		Предстоит собрать данные для быстрого реактора 4-го поколения
ИТОГО:				> 600**	

* Эти данные являются наиболее надежными характеристиками для выработки рекомендаций по расчету теплообмена в каналах с жидкими металлами.

** В каждом опыте обычно измеряется 10–15 точек. Поэтому банк данных может содержать более 6000 экспериментальных точек.

2. Методики измерений температур по сечению канала и определения коэффициента теплообмена

Основные методы экспериментального определения коэффициентов теплообмена в жидких металлах можно объединить в три группы:

- метод теплообменника, включающий измерение четырех температур на его концах, при известной площади поверхности и простом поперечном сечении, например, труба в трубе;
- метод электронагрева с измерением температур стенки и температуры в потоке металла;
- метод измерения распределений температуры в потоке металла.

Последний метод считается самым сложным, но в то же время он является наиболее перспективным, поскольку только с его помощью можно проводить прямое сравнение опытных данных с теоретическими, исключить влияние на теплоотдачу термического сопротивления на границе стенки с жидким металлом и измерить его значение.

Ниже описываются методики измерений, разработанные в ФЭИ и ЦКТИ, где проводились подобные измерения.

При постоянном тепловом потоке q_w через стенку коэффициент теплообмена находится из выражения

$$\alpha = q_w / (t_w - \bar{t}_f), \quad (1)$$

где t_w — температура стенки; t_f — средняя температура теплоносителя, определяемая по измеренному распределению температуры

$$\bar{t}_f = 2 \int_0^1 t(\xi) u(\xi) \xi d\xi. \quad (2)$$

Здесь $t(\xi)$ — распределение температуры по радиусу трубы; $u(\xi)$ — безразмерный профиль скорости; $\xi = r/R$ — относительный радиус.

Таким образом, коэффициент теплообмена определяется лишь по результатам измерения поля температуры и известного распределения скорости

$$\alpha = -\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R} / \left[t_w - 2 \int_0^1 t(\xi) u(\xi) \xi d\xi \right], \quad (3)$$

где λ — коэффициент теплопроводности среды.

При проведении экспериментов с жидкими металлами исследователям пришлось преодолевать много трудностей.

Обычно разница температур ($t_w - t_f$) в опытах составляет несколько градусов при достаточно высоком уровне температуры.

В этих условиях на корольке термопары наблюдается существенный перепад температуры. Увеличить разность температур можно, если повысить плотность теплового потока с помощью мощных электрических нагревателей, теплового клина или обогрева другим теплоносителем. Снижение уровня температуры достигалось путем использования металлов с достаточно низкой температурой плавления, например, ртуть (-39°C), эвтектических сплавов типа Na-K ($t_{\text{пл}} = -12^\circ\text{C}$) или Pb-Bi ($t_{\text{пл}} = 125^\circ\text{C}$).

2.1 Конструкция экспериментального участка и зонда ФЭИ

Для измерения малых разностей температуры специалистами ФЭИ были разработаны микротермопары диаметром до 0,2 мм в капиллярных чехлах из нержавеющей стали. Сплюснутый спай микротермопары толщиной 0,1 мм заделывается вблизи поверхности теплообмена во фрезерованные канавки. Затем производятся напыление материала стенки и обработка поверхности. Такой способ применяется и для измерений температуры стенки. Было налажено полупромышленное производство микротермопар из стандартного термопарного кабеля. Для измерения профилей температуры непосредственно в потоках теплоносителей были разработаны конструкции передвижных зондов, которые показаны на рис. 1–4 [3, 4].

Для очистки теплоносителей от примесей и продуктов коррозии была разработана технология, включавшая их отстаивание, использование фильтров, холодных и горячих ловушек разного типа. Это позволило получать содержание примесей не более 5...10 ppm, т. е. $(5...10) \cdot 10^{-4} \%$

Для измерений профилей температуры в потоке жидкого металла на экспериментальном участке устанавливается передвижная термопара на верхнем конце трубы. Такая конструкция более приемлема (в случае использования электрического нагревателя), чем введение зонда через боковую поверхность, так как последнее неизбежно нарушает равномерность тепловыделения и вносит искажения в распределение температуры.

Перемещение термопары по диаметру трубы осуществлялось поворотом чехла термопары в шарнире, ось которого перпендикулярна оси трубы. Шарнирное соединение защищалось от жидкого металла сальфоном. Конец термопары при движении поперек трубы описывал дугу с высотой 0,4 мм.

Ввиду малости высоты дуги при любых возможных в опытах подогревах жидкости изменение температуры за счет смещения спая вдоль потока на высоту дуги пренебрежимо мало.

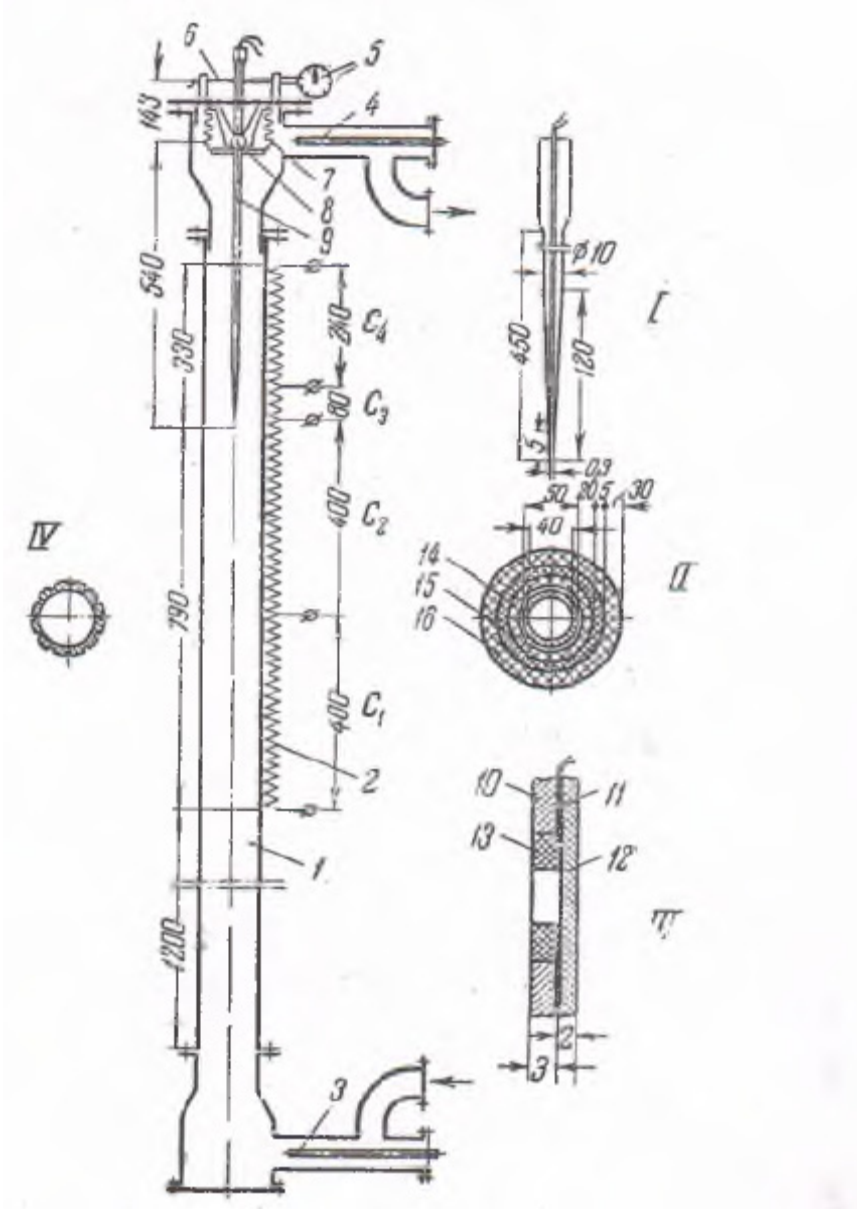
Перемещение термопары осуществлялось при помощи тягового винта, а измерение перемещений королька термопары — индикатором с ценой деления 0,01 мм. Соотношение длин верхнего и нижнего плеча составляло 3,78.

Одна конструкция термопарного зонда показана на рис. 2. Конец зонда выполнен в виде конуса диаметром на тонком конце 1 мм. Толщина спая термопары 0,3 мм.

После изготовления термопары этот спай расплющивается до толщины $\sim 0,1 \div 0,12$ мм. Материалы термопар — хромель-алюмель.

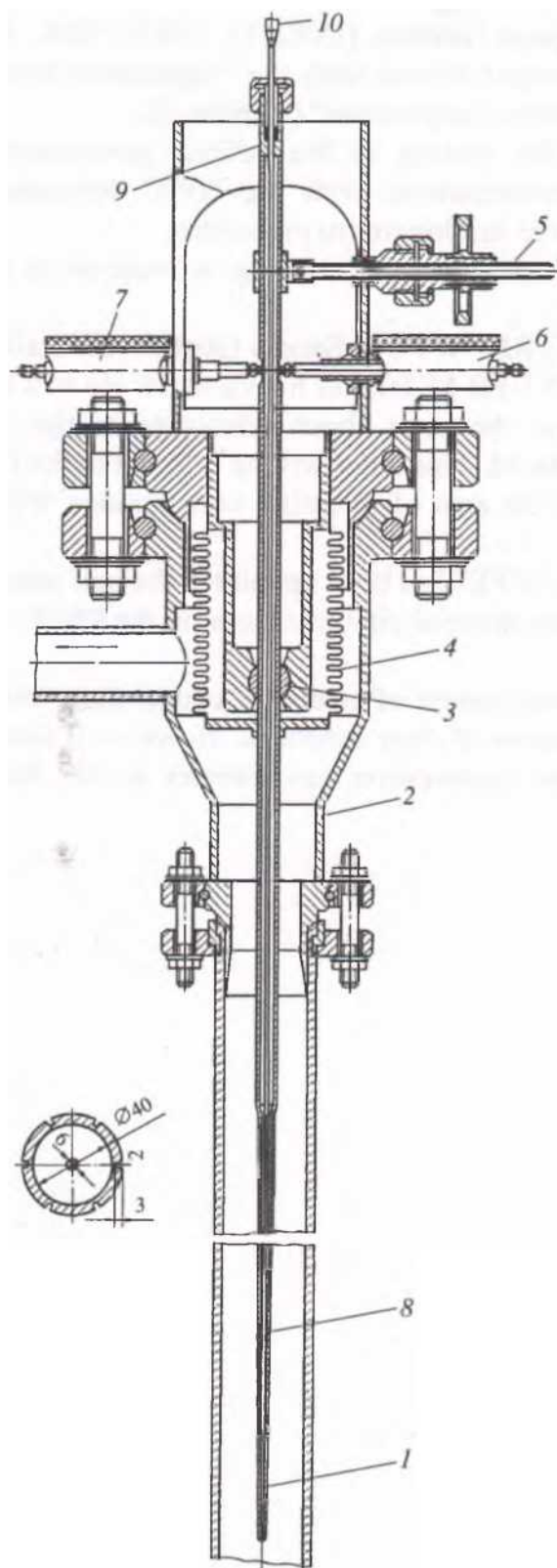
При сборке всей конструкции главное внимание было обращено на тщательность подгонки соприкасающихся деталей в шарнирном соединении.

Проверка тщательности сборки термопары производилась многократными специальными измерениями, при которых сопоставлялись перемещения королька термопары с показаниями индикатора. Окончательной проверкой правильности положения спая термопары служила симметрия получаемых профилей температуры относительно оси трубы.



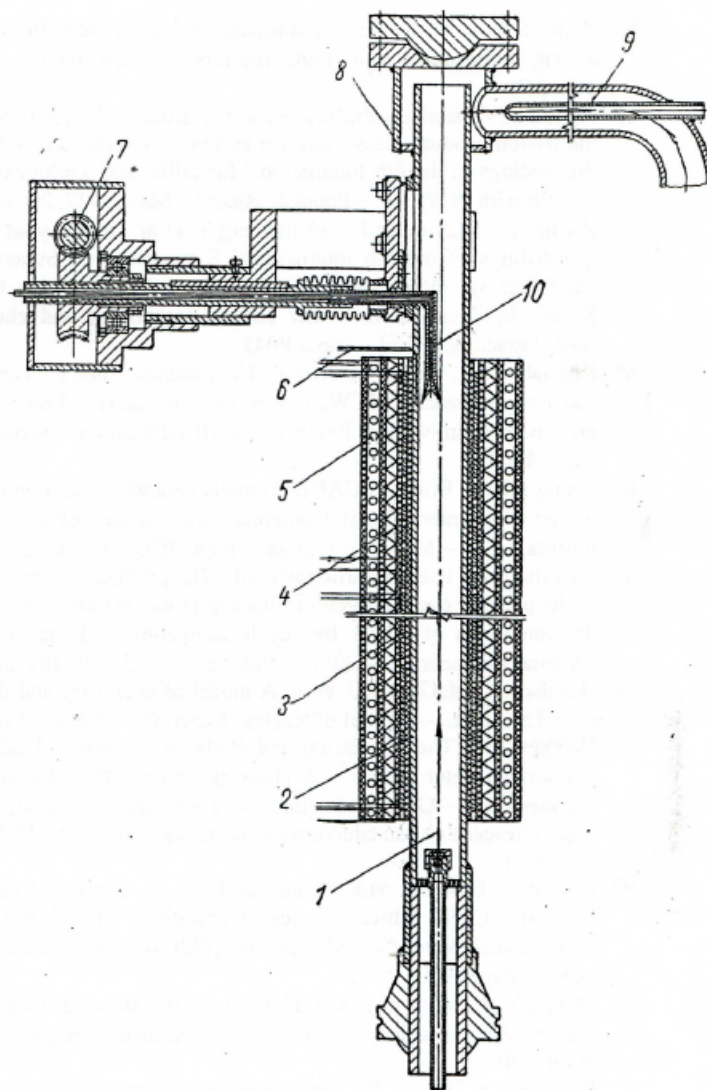
1 – труба; 2 – нагреватель; 3, 4 – термопары, измеряющие температуры на входе и выходе жидкости; 5 – индикатор перемещений передвижной термопары; 6 – винт, перемещающий термопару; 7 – сильфон; 8 – шарнир; 9 – передвижная термопара; 10 – алунд; 11 – термопара в стенке трубы; 12 – стенка трубы; 13 – клин для зачеканки термопары; 14 – внутренний слой тепловой изоляции; 15 – термомеры; 16 – наружный слой тепловой изоляции

Рис. 1. Схема экспериментального участка и передвижной термопары:
 I – термопарный зонд; II, IV – поперечные разрезы экспериментального участка;
 III – схема заделки термопары в стенку. C₁, C₂, C₃, C₄ – секции нагревателя



1 – термопарный зонд; 2 – корпус камеры; 3 – шарнир; 4 – сильфон; 5 – винт;
6, 7 – индикаторы; 8 – защитный чехол; 9 – сальник; 10 – термоэлектроды

Рис. 2. Термозонд для измерений профилей температуры жидкого металла



1 – термопара на входе; 2 – экспериментальная труба; 3 – нагреватель; 4 – тепломер;
 5 – компенсационный нагреватель; 6 – термопара, заделанная в стенке трубы;
 7 – червячный редуктор; 8 – смесительная камера; 9 – чехол для термопары на выходе;
 10 – подвижные термопары

Рис. 3. Экспериментальный участок для опытов тяжелыми металлами

2.2. Конструкция зонда ЦКТИ

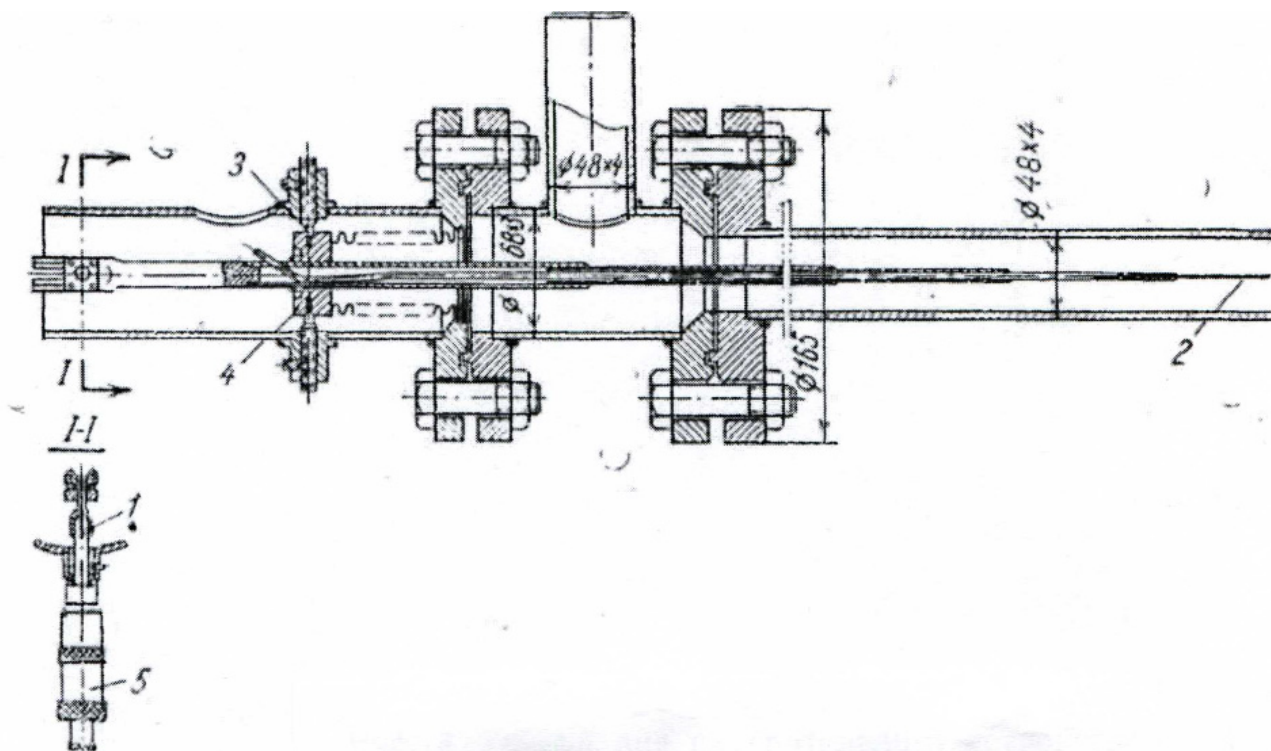
Поля температур по сечению потока измерялись на расстоянии $27,5D$ от начала обогреваемого участка с помощью измерительного устройства, общий вид которого показан на рис. 4.

При помощи тяги 1 подвижная термопара 2 поворачивалась около штифтов 3 качающегося шарнира 4. При этом головка термопары двигалась по дуге. Угол отклонения зонда термопары от оси трубы составлял максимально 2° . Положение подвижной термопары по диаметру трубы фиксировалось микрометром 5.

Подвижная термопара изготовлялась из хромель-алюмелевой проволоки $\varnothing 0,18$ мм. Спай термопары помещался в защитную трубку наружным диаметром 1,2 мм и выполнялся в виде лопатки размером $1,4 \times 0,5$ мм.

Для компенсации тепловых потерь изоляции на рабочем участке с помощью секционно намотанных нагревателей был установлен компенсационный тепловой пояс, который исключал утечки тепла наружу.

Контроль осуществлялся термопарами, заложенными по глубине изоляции.



1 – шпон тягового устройства; 2 – микротермопара; 3 – штифты;
4 – шарнир качения; 5 – микрометр

Рис. 4. Общий вид измерительного устройства ЦКТИ [5]

3. Методика проведения экспериментов и обработки опытных данных

Для наладки установки были проведены опыты по замеру теплоотдачи к воде. Полученные результаты совпали с известными расчетными рекомендациями.

При проведении опытов на натрии измерялось количество подведенной на рабочий участок электрической энергии, расход натрия, температура на входе, выходе и по сечению рабочего участка, температура стенки по длине трубы и температура изоляции. По разности теплосодержания натрия на входе в рабочий участок и на выходе из него и по подведенной электрической мощности в каждом опыте сводился баланс тепла. В 70 % расхождение баланса не превышало ± 5 %, а в остальных оно было не больше ± 10 %.

Средняя по сечению потока температура жидкости рассчитывалась по формуле (2).

Температура стенки, определялась экстраполяцией температурного профиля до стенки. Правильность экстраполяции проверялась по граничному условию

$$\left. \frac{dt}{dr} \right|_{r=r_0} = - \left. \frac{q}{\lambda} \right|_{r=r_0} . \quad (4)$$

Другой способ определения величины $t_{ст}$ заключался в непосредственном замере температуры термопарой, заложенной в стенку трубы. При этом учитывалась глубина заделки горячего спая термопары и соответствующие перепады температуры в заделки термопары.

Для нахождения в формуле значений $u(\xi)$ (2) принималось степенное распределение скоростей.

4. Соотношение для расчета коэффициентов теплообмена

При исследовании установившегося по длине теплообмена в жидких металлах пришли к выводу, что в обычном критериальном уравнении $Nu = f(Re, Pe)$ можно приближенно исключить число Рейнольдса. Эта гипотеза широко используется при расчетах коэффициентов теплообмена жидких металлов. Работы, показывающие появление существенных дополнительных погрешностей при ее применении, практически неизвестны.

Хорошо известно, что для ламинарного потока с параболическим профилем скорости в круглых трубах при $q = \text{const}$, $Nu = 4,36$ независимо от вида теплоносителя, т. е. значений Pr . Для развитого турбулентного потока при $q = \text{const}$ и $Pr = 0$ и при плоском профиле скорости предельное значение $Nu = 8$ [6].

Первый теоретический расчет коэффициента теплообмена для турбулентного потока металлов был выполнен Р. Мартинелли [7]. В этой работе учтено влияние на теплоотдачу температуропроводности жидкого металла не только в пограничном и буферном слоях, но также и в турбулентном ядре потока. Лайон Р. [8] предложил более простой метод для расчета теплообмена в круглых трубах (интегральный метод Лайона), который вошел во многие учебники

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

Эта формула получена при условии равенства единице турбулентного числа Прандтля, что являлось в то время лишь предпосылкой и не было доказано.

Для сплава Pb-Bi сотрудники ЭНИН рекомендовали [1] формулу:

$$Nu = A + 0,014Pe^{0,8}, \quad (6)$$

в которой $A=3$ при наличии оксидных пленок на стенке, $A=4,5...5$ для чистых поверхностей.

Вскоре было установлено, что первый член в формулах (5) и (6) при $Pr \rightarrow 0$ должен быть ближе к 8, а не к 3. Попытки объяснить это различие [2] снижением коэффициента турбулентного переноса тепла вследствие высокой теплопроводности жидких металлах по сравнению с обычными теплоносителями (вода, газы) оказались несостоятельными. Причина заключалась в другом.

При проведении первых опытов чистота металла не контролировалась, и какие-либо меры по его очистке от примесей не принимались. Отмечалось лишь, что в «чистых» условиях наблюдались более высокие значения коэффициента теплообмена.

5. Результаты

Составленный банк данных по 37 исследованиям российских и зарубежных исследований о распределениях температур в потоках пяти различных жидких металлов (табл. 2) может использоваться для выработки более точных рекомендаций расчетов теплообмена (если это понадобится) в будущих работах и для анализа теоретических и экспериментальных результатов в дальнейших разработках.

Таблица 2. Сводные данные работ по измерениям полей температуры в потоках жидких металлов*

	Российские	Зарубежные	Всего:
Ртуть	8	4	12
Сплав Na-K	7	2	9
Натрий	3	1	4
Литий	4	0	4
Сплав Pb-Bi	8	0	8
Всего:	30	7	37

* Эти данные являются наиболее надежными характеристиками для выработки рекомендаций по расчету интенсивности теплообмена в каналах с жидкими металлами.

Список литературы

1. Михеев М.А., Баум В.А., Воскресенский К.Д., Федынский О.С. Теплоотдача расплавленных металлов / В кн.: Реакторостроении и теория реакторов – М.: Издательство АН СССР, 1955.
2. Воскресенский К.Д., Турилина Е.С. Приближенный расчет теплоотдачи жидких металлов / В сб.: Теплопередачи и тепловое моделирование – М.: Издательство АН СССР, 1959. с. 87–92.
3. Кириллов П.Л., Субботин В.И., Суворов М.Я., Троянов М.Ф. Исследования теплоотдачи в трубе к сплаву натрия – калий / В сб.: Вопросы теплообмена – М.: Издательство АН СССР, 1959. с. 80–95.
4. Кириллов П.Л., Ушаков П.А. / Теплоэнергетика 2001. См. также перевод Thermal Engineering. Heat transfer to liquid metals: specific features, methods of investigation and mail relationships / 2001. v 48, № 1, p. 50–59.
5. Боришанский В.М., Гельман Л.И., Заблоцкая Т.В. и др. / В сб.: Конвективная теплоотдача в двухфазном и однофазном потоках – М. – Л.: Энергия, 1964. с. 336.
6. Кириллов П.Л. О предельных значениях коэффициента теплообмена / Теплофизика высоких температур, 1963, т. 1, вып. 1, с. 102–106.
7. Martinelli R.C. Heat transfer to molten metals / Trans ASME v. 69, No 8. 1946. p. 947–952.
8. Lyon R.N. Liquid metal heat transfer coefficients / Chem. Eng. Progress, v. 47, № 2, 1951.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Форма представления (описания) в банке данных

Образец:

ENTRY	КНИГА 1 (РТУТЬ)
TITLE	ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ РТУТИ В ТРУБЕ
AUTHOR	СУББОТИН В.И., НОМОФИЛОВ Е.В., ИБРАГИМОВ М.Х.
INSTITUTE	(СССР ФЭИ)
REFERENCE	(Ж. ТЭ, 1963, №6, Р.70-74) ДАННЫЕ В ВИДЕ ТАБЛИЦ
QUANTITY	(PR,RE,Y,DT,YU,TU,TC, L/D)
TEST-SECT	(ТРУБ,ВЕРТ,ГЛАД,РАВН,НЕТ,НЕТ,НЕТ)
HEAT-AGENT	(РТУТЬ)
MATERIAL	(1Х18Н9Т)
GEOMETRY	(DIN=29,3 MM; L=1300 MM; LH=980 MM; L/D=32.25; DW=2,35MM)
PROCESS	(PR=0.0240 - 0.0280; RE=19300 - 427000; W=0,080 - 1.720 M/S) T=10.1 - 41.0 GRAD; Q=13500 - 503000 ККАЛ/М2.Ч)

ТАБЛИЦА 1

№	Pr.10-3	Pe,10+3	Re,10+3	W	TF	DT	Q,10+3
ОПЫТА	NODIM	NODIM	NODIM	M/S	GRAD	GRAD	ККАЛ/М2.Ч
1	26,06	4,00	153,50	0,590	24,70	3,19	22,450
2	25,79	4,50	174,50	0,661	27,80	4,66	32,200
3	23,80	4,85	203,80	0,731	28,10	4,45	32,200
4	25,66	5,26	205,00	0,776	28,80	4,47	33,200
5	25,61	5,84	228,00	0,860	29,00	4,85	38,800
6	25,55	7,00	274,00	1,030	28,80	4,62	38,700
7	25,63	7,70	300,40	1,130	30,40	4,90	44,400
8	25,30	8,30	328,00	1,235	29,50	4,60	45,500
9	25,35	9,05	357,00	1,340	30,20	4,26	46,000
10	28,15	10,50	373,00	1,500	10,10	4,74	50,300
11	28,29	11,60	410,00	1,650	10,20	4,15	50,300
12	28,34	12,10	427,00	1,720	10,10	4,16	50,300
13	27,96	3,90	139,50	0,562	12,70	3,31	22,600
14	26,43	3,41	129,00	0,495	24,60	3,52	22,500
15	25,86	2,78	107,50	0,410	27,40	3,85	22,500
16	25,73	2,54	98,70	0,376	27,40	3,57	21,600
17	25,76	2,28	88,50	0,347	29,40	3,87	20,200
18	25,50	2,18	85,50	0,322	29,80	3,84	19,800
19	26,81	1,22	45,50	0,179	21,80	5,40	17,000
20	26,90	1,13	42,00	0,166	22,20	4,83	15,900
21	24,06	0,90	37,40	0,146	24,70	5,57	16,300
22	26,10	0,95	36,20	0,139	28,10	5,36	16,700
23	25,78	0,81	31,50	0,120	26,00	5,45	14,350
24	25,90	0,87	33,40	0,127	28,80	5,02	13,900
25	25,52	0,73	28,60	0,108	32,40	5,67	13,500
26	25,19	0,66	26,00	0,098	35,30	6,29	13,500
27	25,21	0,60	23,80	0,088	37,70	6,20	13,500
28	24,43	0,54	22,10	0,080	41,00	6,33	13,500

Список публикаций, использованных при составлении банка данных

Ртуть:

1. Субботин В.И., Номофилов Е.В., Ибрагимов М.Х. Измерение полей температуры при турбулентном течении ртути в трубе. // Теплоэнергетика, 1963, №6, с.70-74.
2. Isakoff S.H.E., Drew T.B. Heat and mass transfer in turbulent flow of mercury. Proc. Int. Heat Transfer Conference, 1961-1962, p.405-409.
3. Кокорев Л.С., Ряпосов В.Н. Турбулентный перенос тепла при течении в трубе теплоносителя с малым числом Прандтля. // ПМТФ, 1962, №2 с.42-49.
4. Кокорев Л.С., Ряпосов В.Н. Измерения распределения температуры в турбулентном потоке ртути в круглой трубе. / Сб. «Жидкие металлы». – М.: Госатомиздат, 1963. – С. 124-138.
5. Brown M.E., Amstead B.H., Short B.E. Temperature and velocity distribution and transfer of heat in a liquid metal. J, TASME/C, 1957, v.79, №2, p.279.
6. Боришанский В.М., Гельман Л.И., Заблочкая Т.В., Иващенко Н.И., Копп И.З. Исследование теплоотдачи при течении в горизонтальных и вертикальных трубах. / Сб. «Конвективная теплопередача в двухфазных и однофазных потоках». – М. ; Л. : Энергия, 1964, с.350-362.
7. Ибрагимов М.Х., Работяшкин Ю.М., Сабелев Г.И., Сидоров В.И., Субботин В.И. Перенос тепла при турбулентном течении жидкости в квадратном канале. / Сб. «Жидкие металлы». – М.: Атомиздат 1967, с.82-102.
8. Кириллов П.Л., Субботин В.И., Суворов М.Я., Троянов М.Ф. Теплоотдача в трубе к сплаву натрия с калием и к ртути. // Атомная энергия, 1959, т.6, вып.4, с.382-390.
9. Buhr H.O., Carr A.D., Balzhiser R.E. Temperature profiles in liquid metals and the effect of superimposed free convection in turbulent flow. Теплоэнергетика, 1968, p.641-654.
10. Buhr H.O., Carr A.D., Horsten E.A. Влияние обогрева на профили скорости и температуры при турбулентном течении ртути в вертикальной трубе. Теплопередача 1974, 96 (2) с.38-45.
11. Бобков В.П., Грибанов Ю.И., Ибрагимов М.Х., Номофилов Е.В., Субботин В.И. Измерение интенсивности пульсации температур при турбулентном течении ртути в трубе. // Теплофизика высоких температур, 1965, том 3, с.708-716.
12. Сидоров В.И. Исследование теплоотдачи и полей температур в прямоугольных каналах. Диссертация 1965. Арх. №1-1/0-НТ – 3925. См. также сб. «Жидкие металлы». – М.: Атомиздат, 1967. – С. 82-102.

Натрий:

13. Боришанский В.М., Заблочкая Т.В., Иващенко Н.И. Исследование теплообмена и полей температур при турбулентном движении металлического натрия в трубах. / Сб. «Конвективная теплопередача в двухфазных и однофазных потоках». – М. ; Л. : Энергия, 1964. с.363-377.
14. Пирогов М.С. Теплоотдача к натрию в области малых чисел пекле. / Сб. «Жидкие металлы», 1963, с.94. // См. также «Атомная энергия» 1960, т.8, №4, с.367-368. // См. также «Теплоэнергетика» 1961, №3, с.62-64.
15. Субботин В.И., Паповянец А.К., Кириллов П.Л., Ивановский Н.Н. Изучение теплоотдачи к жидкому натрию в трубах. // Атомная энергия, 1962, т.13, вып.4, с.380-382.
16. Takken L. (Taccen L.) Int.J.Heat mass transfer., 1967, 10, №12, 1649-1660.

Натрий-Калий:

17. Субботин В.И., Амплеев Н.А., Кириллов П.Л., Суворов М.Я. Теплообмен жидкого металла в круглых трубах (переходной режим течения и участок стабилизации). Отчёт, ТФ-435, 1964. Арх. 1-1-НТ-1453.
18. Амплеев Н.А., Кириллов П.Л., Субботин В.И., Суворов М.Я. Теплообмен жидкого металла в вертикальной круглой трубе при низких значениях числа Re . Отчёт, ТФ-462, №4223, 1965-6. Арх. 1-1-НТ-1602.
19. Кириллов П.Л. Субботин В.И., Суворов М.Я., Троянов М.Ф. Исследование теплоотдачи в трубе к сплаву натрий-калий. Сб. «Вопросы Теплообмена». – М.: Изд.АН СССР, 1959, с.80-95.
20. Buhr H.O., Carr A.D., Balzhiser R.E. Temperature profiles in liquid metals and the effect of superimposed free convection in turbulent flow. Int. Jour. Heat mass transfer, 1968, V.11, p.641-654.
21. Sleicher C.A., Awad A.S., Notter R.H. Temperature and eddy diffusivity profiles in NaK. Int. Jour. Heat mass transfer, 1973, v.16, n.8, p.1565-1575.
22. Кудрявцева Л.К., Каляскин В.И., Митрошин В.Г., Соколова Л.В. Экспериментальное исследование температурных полей в ячейке плотной упаковки стержней. (Часть 1. Устройство экспериментального участка и предварительные опытные данные). Отчёт, ТФ-571, №733, 1969. Арх. 1-1-НТ-2207.
23. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н., Номофилов Е.В. Теплоотдача при турбулентном течении жидких металлов в трубах. // Атомная энергия, 1961, т. 11, №2, с. 133-139.
24. Кириллов П.Л., Субботин В.И., Суворов М.Я., Троянов М.Ф. Теплоотдача в трубе к сплаву натрия с калием и к ртути. // Атомная энергия, 1959, т.6, вып.4. с.382-390.
25. Субботин В.И., Таланов В.Д., Ушаков П.С., Габрианович Б.Н., Свириденко И.П. Исследование теплоотдачи при течении жидких металлов в трубах. Отчёт, № 3378, 1961. Арх. 1-1-НТ-1040.

Литий:

26. Орлов Ю.И. Исследование теплоотдачи и контактного термического сопротивления на макетах активных зон с литиевым теплоносителем. Дисс., ФЭИ, 1965. Арх. 1-1/с-НТ-3920. 204 л.
27. Ивановский М.Н. Изучение лития в качестве теплоносителя для атомных реакторов. Дисс., ФЭИ, 1965. Арх. 1-1/с-НТ-3912. 175 л.
28. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Орлов Ю.И., Блохин В.А., Синявский В.Ф., Козина М.И., Барышникова Е.А. «Исследование полей температуры и контактного термического сопротивления при течении лития в трубе». Часть II. Отчёт, ФЭИ, 1965. Арх. 1-1/с-НТ-3867. 58 л.
29. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Орлов Ю.И., Бобков В.П., Блохин В.А., Синявский В.Ф. «Исследование полей температур, термического контактного сопротивления и полей скоростей при течении лития в трубах». Часть 1. Создание и наладка экспериментального стенда. Отчет, ФЭИ, 1963 г., Арх. 1-1/с-НТ-3035.

Свинец-висмут:

30. Ибрагимов М.Х., Номофилов Е.В. Исследование теплообмена на входном участке трубы при турбулентном течении эвтектического сплава свинец-висмут. Отчёт, ФЭИ, 1961, Арх. 1-1/с НТ-2266. 44 – 74 л.
31. Хачатуров Х.А., Ибрагимов М.Х., Номофилов Е.В. Исследование теплообмена при течении эвтектического сплава свинец-висмут в трубе. Отчёт, ФЭИ, 1960. Арх. 1-1/с НТ-1931. 161 – 183 л.
32. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ивановский М.Н., Номофилов Е.В., Орлов Ю.И., Тычинский Н.А. Изучение теплоотдачи при нагреве и охлаждении эвтектического сплава свинец-висмут с различным содержанием окислов. Отчёт, ФЭИ, 1964, Арх. 1-1/с НТ-3363. 24 л.
33. Субботин В.И., Хачатуров Х.А., Ибрагимов М.Х., Номофилов Е.В. Исследование теплообмена при течении эвтектического сплава свинец-висмут в трубе. Отчёт, № 1913, 1960.
34. Ибрагимов М.Х., Субботин В.И., Ушаков П.А. Исследование теплоотдачи при турбулентном течении в трубах тяжёлых жидких металлов. // Атомная энергия, 1960, т.8, вып.1, с.54-56.
35. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Номофилов Е.В. Теплоотдача на участке тепловой стабилизации при турбулентном течении жидких металлов в трубе. // Атомная энергия, 1962, т.13, вып.2, с.155-161.
36. Ушаков П.А. Исследования гидродинамики и теплообмена для реакторов, охлаждаемых сплавом свинец-висмут. / Сборник докладов и конференций «Тяжёлые жидко-металлические теплоносители в ядерных технологиях». Обнинск. – Изд. ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999 г., том 2, с. 657-673.
37. Номофилов Е.В. Исследование закономерностей турбулентного переноса тепла. Диссертация ФЭИ 1963 г. Арх. №1-1/с-НТ-3280, 199 л.

Подписано к печати 24.12.2017 г.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 0,7. Уч.-изд. л. 0,7.
Тираж 30 экз. Заказ № 318

Отпечатано в ОНТИ методом прямого репродуцирования с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.
ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского.