

Рис. 2. Полное нейтронное сечение  $\text{Sm}^{149}$ .

Поскольку мы имели данные только по одному образцу, анализ параметров резонанса вычислялся методом, описанным в работе [4], который позволял получить более высокую точность параметров  $\sigma_0$  и  $\Gamma$ :

$$\sigma\Gamma^2 = \frac{1}{n} (\alpha^* x \Delta)^2. \quad (2)$$

Численные значения корня  $x$  уравнения

$$x - (1 - e^{-x}) = \frac{A}{\sqrt{\pi\alpha^*}} \left( 1 - T_{(x)}/T_p \right) \quad (3)$$

в функции правой части приведены в таблицах работы [4]. Точность решения уравнения (3) относительно  $x$  определяется в основном точностью измерения площади  $A$  под кривой резонансного пропускания образца. Основная неопределенность в полной площади обусловлена вкладом «крыльев» кривой пропускания (где ход полного сечения Брейти-Вигнера отличается от действительного вследствие эффекта Доплера), интерференцией между уровнями и плохой разрешающей способностью спектрометра. Величина  $\sigma\Gamma^2$  вычислялась только для хорошо разрешенных уровней (см. таблицу).

Параметры резонансов индия и самария

E, эв	Индий			Самарий			
	$\sigma_0$ сечение, барн	$\sigma_0\Gamma$ , барн·эв	$\Gamma$ , эв	E, эв	$\sigma_0$ сечение, барн	$\sigma_0\Gamma$ , барн·эв	$\Gamma$ , эв
1,46	26558	285,88	0,1038	0,86	5100	224,4	0,2097
3,85	480	72,96	0,30	3,45	890	—	—
9,2	780	42,32	0,23	2,90	594	—	—

Резонанс самария при 4,90 эв искажен, по-видимому, за счет плохого разрешения прибора.

Поступило в Редакцию 19/IX 1963 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Б. Бегжанов и др. «Атомная энергия», 14, вып. 5 (1963).
2. Р. Б. Бегжанов и др. «Изв. АН УзССР. Сер. физ. матем. наук», вып. 3 (1963).
3. М. И. Певзнер и др. ЖЭТФ, 44, вып. 4 (1963).
4. Г. И. Марчук. Теория и методы расчета ядерных реакторов. М., Госатомиздат, 1962, стр. 240.

УДК 621.039.517

Теплоотдача при движении в трубе металлического натрия

В. М. Боршанский, Т. В. Заблочкая, Н. И. Иващенко

Установка для исследования теплоотдачи при турбулентном течении натрия в обогреваемой трубе представляла собой замкнутый циркуляционный контур. В качестве рабочего участка использовалась вертикальная медная труба диаметром 40 мм. В опытах измерялись температуры стенки трубы по длине и распределение температур по сечению потока теплоносителя на расстоянии 40 диаметров от входа в трубу и 25 диаметров от начала обогрева. Определение температуры стенки как экстраполяцией профиля температур жидкости в потоке по сечению до стенки, так и непосредственным измерением термопарой, заделанной в стенку, позволило изучить условия, влияющие на термическое контактное сопротивление между теплоносителем и стенкой трубы. Для очистки теплоносителя от примесей использовались холодная ловушка, фильтры; от окисления жидкий металл защищался инертным газом. Осуществлялся химический контроль за составом теплоносителя. Опыты проводились при

температурах 175—300° С, скоростях течения  $W = 0,6 \div 1,5$  м/сек, числах  $Re = (6 \div 120) \cdot 10^3$ , числах  $Pe = 35 \div 1000$  и при условии, что тепловой поток на стенке  $q_{ст} = \text{const}$ . Содержание кислорода в натрии регулировалось в различных сериях опытов от 0,02 до 0,1 вес. %.

Результаты измерения теплоотдачи за участком тепловой стабилизации, полученные на основании измерения полей температур по сечению потока, в виде зависимости  $Nu = f(Pe)$  приведены на рис. 1. Экспериментальные точки располагаются около усредняющей кривой с максимальным разбросом  $\pm 20\%$ . Уравнение этой кривой в области  $Pe = 30 \div 200$  имеет вид

$$Nu = 4,36 + 0,016 Pe. \quad (1)$$

Зависимость (1) обеспечивает предельный переход к ламинарному режиму ( $Nu = 4,36$ ) в области малых чисел  $Pe$  аналогично тому, как это сделано в работе [1]. В области чисел  $Pe = 200 \div 1000$  усредняющая



линия рис. 1 совпадает с кривой, рассчитанной по полуэмпирической трехслойной схеме переноса тепла в турбулентном потоке жидкого металла [2]. Поле скоростей принималось по Рейхардту [3]; при условии  $q_{ст} = \text{const}$  эта зависимость может быть записана в виде

$$Nu = 6 + 0,027 Pe^{0,8}. \quad (2)$$

На рис. 2 линия 1-3 получена по формулам (1) и (2) в указанных интервалах чисел  $Pe$ . Линия 2-3 соответствует полуэмпирической формуле ЦКТИ [2]

$$Nu = 7,5 + 0,005 Pe. \quad (3)$$

Этот расчет выполнен при условии  $q_{ст} = \text{const}$ ,  $\frac{\omega}{w} = 1$ . Из рис. 2

следует, что во всем охваченном опытами диапазоне чисел  $Pe = 30 \div 1000$  результаты расчета по трем указанным формулам совпадают (в приведенных выше пределах применимости этих формул). Максимальное расхождение при  $Pe = 300$  не превышает 9%, что находится в пределах точности опытов. Поэтому для простоты инженерный расчет теплоотдачи можно вести по формуле (1) в интервале чисел  $Pe = 30 \div 300$  и по формуле (3) в интервале чисел  $Pe = 300 \div 1000$ . Необходимо отметить, что формула (3) дает хорошее согласие с опытами и при числах  $Pe > 1000$ .

На этом же графике нанесена кривая, рассчитанная по формуле

$$Nu = 5 + 0,025 Pe^{0,8}, \quad (4)$$

которая получена в результате теоретического решения задачи [4] при условии  $t_{ст} = \text{const}$ . Эта зависимость соответствует также опытным данным [5] по измерению теплоотдачи к жидкометаллическому натрию при течении в трубах и условию  $q_{ст} = \text{const}$ . Числа  $Nu$  в работе [5] так же, как и в настоящей, рассчитывались экстраполяцией измеренного поля температур натрия до стенки.

Расчет теплоотдачи на основе непосредственных измерений температур стенки, полученных в настоящей работе, дает расположение опытных точек более низкое, чем на рис. 1. На рис. 3 приведена расчетная зависимость относительной теплоотдачи  $Nu_1/Nu$  от числа  $Pe$  и весового содержания кислорода в натрии (здесь  $Nu$  и  $Nu_1$  — числа Нуссельта, рассчитанные соответственно по измеренному полю температур в сечении потока и по температуре стенки, непосредственно измеренной термопарами). Кривые рис. 3 построены на основании линий, усредняющих опытные данные в координатах

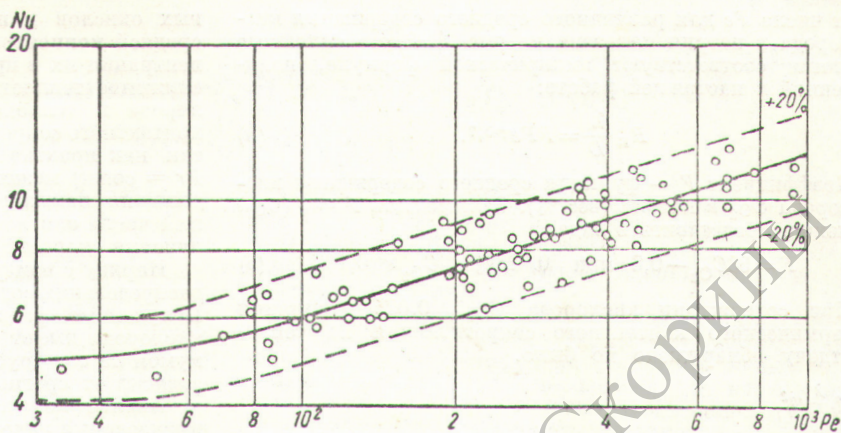


Рис. 1. Теплоотдача за участком тепловой стабилизации:  
○ — опытные данные; — — усредняющая линия.

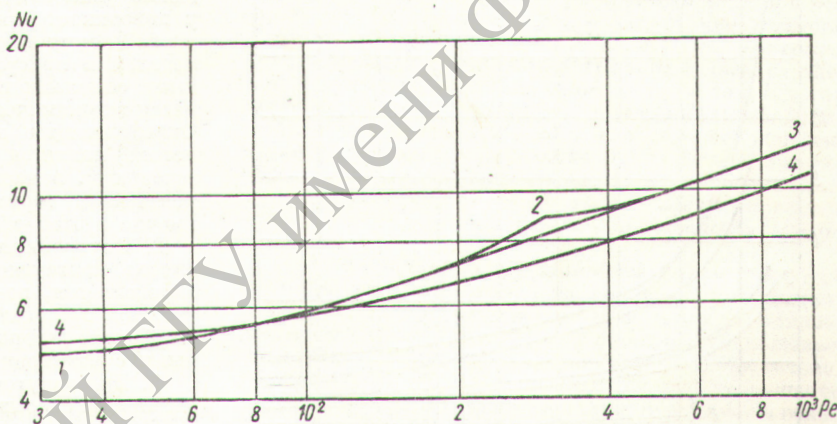


Рис. 2. Сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей  $Nu = f(Pe)$ :

1 — расчет по формуле (1); 2 — расчет по формуле (3); 4 — расчет по формуле (4); 1 — 3 — линия, усредняющая опытные данные настоящей работы.

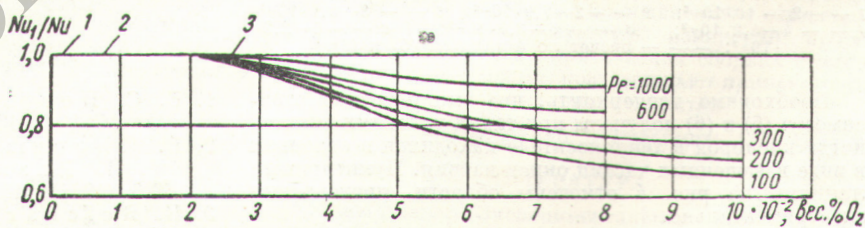


Рис. 3. Зависимость относительной теплоотдачи от содержания кислорода в натрии для различных чисел  $Pe$ :

1 — данные работы [5]; 2 — данные работы [6]; 3 — данные авторов.

натах  $Nu_1 = f(Pe)$  при постоянных содержаниях кислорода в теплоносителе. Разброс опытных точек вокруг усредняющих кривых составляет  $\pm 12\%$ .

Зависимость безразмерного термического контактного сопротивления, рассчитанного по формуле

$$R_k \frac{\lambda}{D} = \frac{1}{Nu_1} - \frac{1}{Nu},$$



от числа  $Re$  для различного среднего содержания кислорода в натрии показана на рис. 4. Здесь сплошные линии соответствуют эмпирической формуле, полученной в настоящей работе:

$$R_k \frac{\lambda}{D} = F Pe^{-0,7} \quad (5)$$

Коэффициент  $F$  — функция среднего содержания кислорода  $CO_2$  в натрии (вес.%). Зависимость  $F = f(CO_2)$  можно представить в виде

$$F = 33C_{O_2} - 0,8 \text{ при } 0,025\% \leq C_{O_2} \leq 0,1\% \quad (6)$$

При содержании кислорода  $CO_2 < 0,025\%$  влияния термического контактного сопротивления на теплоотдачу обнаружено не было.

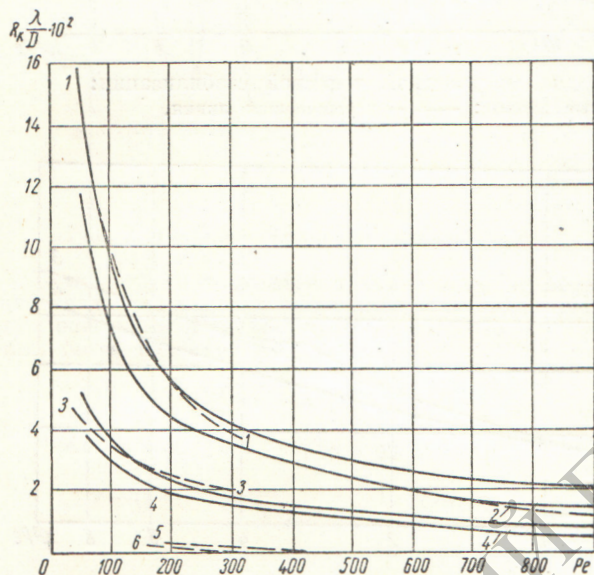


Рис. 4. Зависимость безразмерного термического контактного сопротивления от числа  $Re$  при различном содержании кислорода в натрии, вес.%:

1 —  $-2 - 10 \cdot 10^{-2}$ ; 2 —  $-2 - 7,9 \cdot 10^{-2}$ ; 3 —  $-3 - 5,1 \cdot 10^{-2}$ ;  
4 —  $-4 - 4,2 \cdot 10^{-2}$ ; 5 —  $-5 - 3,0 \cdot 10^{-2}$ ; 6 —  $-6 - 2,2 \cdot 10^{-2}$ ;  
— — расчет по формулам (5) и (6).

Необходимо подчеркнуть, что эмпирические зависимости (5) и (6) получены при таких условиях опытов, когда кислород в теплоносителе находился в основном в виде взвешенных частиц окиси натрия. Пунктирными линиями на рис. 4 отмечены области, проверенные экспериментально.

Теплоотдача к жидким металлам зависит от сложного комплекса физико-химических условий протекания процесса. Одним из основных факторов, влияющих на уровень теплоотдачи к щелочным металлам, по-видимому, является содержание кислорода в теплоносителе. В условиях проведенных опытов в натрии оно превышало предел растворимости. Изменения теплоотдачи и контактного термического сопротивления в зависимости от изменения содержания кислорода вызываются, по-видимому, присутствием нерастворен-

ных окислов в пристенной области. С увеличением средней концентрации окислов увеличивается и концентрация их в пристенном вязком слое. Этим вызвано снижение теплоотдачи с повышением содержания кислорода в теплоносителе. Уменьшение термического контактного сопротивления с ростом числа  $Re$  ( $Pe \sim Re$ , так как практически можно считать, что в опытах  $Pr = \text{const}$ ) может быть связано как с уменьшением толщины ламинарного подслоя, так и с уносом большей части окислов из пристенного слоя по мере увеличения скорости потока.

Наряду с измерением теплоотдачи были определены распределения содержания окислов по сечению потока. Полученные радиальные зависимости концентрации кислорода имеют вид симметричных кривых с максимумом на оси трубы. Кривизна профиля концентраций зависит от среднего содержания окислов в потоке.

Анализ изложенных результатов и соображения, высказанные ранее в литературе [7], позволяют в первом приближении характеризовать области контактных термических сопротивлений, вызывающих ухудшение теплообмена при движении жидкого металла у поверхностей нагрева.

1. Внешняя диффузионная область. Ламинарный подслоя в пристенной области заполняется взвешенными окислами и другими примесями, которые находятся в динамическом равновесии с основным потоком. Определяющим здесь (при постоянной температуре потока) является влияние гидродинамических режимов течения и, в частности, числа  $Re$ . В настоящей работе контактное термическое сопротивление наблюдалось именно в этой области.

2. Внутренняя диффузионная область. В этом случае контактное сопротивление в первую очередь определяется, по-видимому, физико-химическими процессами, протекающими непосредственно вблизи стенки (сорбцией, десорбцией и другими явлениями, связанными с изменением поверхностной энергии системы).

3. Промежуточная область, где оба упомянутых механизма сказываются на интенсивности теплообмена.

Такая классификация областей в известной мере дает возможность качественно оценить механизм образования контактных сопротивлений, влияющих на теплообмен в жидких металлах.

Поступило в Редакцию 25/VII 1963 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. С. Петухов, А. Я. Юшин. «Докл. АН СССР», 136, 1321 (1961).
2. В. М. Боришанский, Т. В. Заблочка, Н. И. Иващенко. «Атомная энергия», 11, 426 (1961); 14, 320 (1963).
3. Н. Reichardt. Z. angew. Math. und Mech., Nr. 7, 208 (1951).
4. R. Seban, T. Shimazaki. Trans. ASME, 76, 6 (1951).
5. В. И. Субботин и др. «Атомная энергия», 13, 380 (1962).
6. М. С. Пирогов. «Теплоэнергетика», № 3, 62 (1961).
7. А. С. Андреев. В сб. «Вопросы магнитной гидродинамики и динамики плазмы». Рига, Изд-во АН Латв. ССР, 1962, стр. 653.