

4. R. Askroyd, G. Kinchin, J. Mann, J. McCullen. Доклад № 1462, представленный Англией на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).
5. М. Шульц. Регулирование энергетических

- ядерных реакторов. М., Изд-во иностр. лит., 1957.
6. W. Ergen, A. Weinberg. Physica, 20, 413 (1954).
7. В. В. Немыцкий, В. В. Степанов. Качественная теория дифференциальных уравнений. М.—Л., Гостехиздат, 1947.

Теплоотдача при течении ртути в кольцевых каналах

В. И. Петровичев

В настоящее время расчет теплоотдачи при течении жидких металлов в кольцевых каналах принято выполнять в первом приближении по формулам теплоотдачи, справедливым для круглых труб (с чистыми поверхностями), с введением гидравлического эквивалентного диаметра [1—4]:

$$Nu = 4,8 + 0,014 Pe^{0,8}, \quad (1)$$

Лайон [5] на основании аналитических расчетов в этом случае рекомендует следующую формулу для кольцевого канала:

$$Nu_{к.к.} = 0,75 Nu_{тр} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0,3}, \quad (2)$$

где

$$Nu_{тр} = 7 + 0,025 Pe^{0,8} \text{ (для трубы)}. \quad (3)$$

Здесь числа Nu и Pe определены также по гидравлическому эквивалентному диаметру $d_{к.к.} = d_2 - d_1$.

Известно, что благодаря высокой «молекулярной» теплопроводности жидких металлов величина теплового пограничного слоя при турбулентном течении становится сравнимой с размером самого канала. Поэтому формула (2), учитывающая геометрические особенности канала, должна более правильно отражать специфику теплоотдачи в этих условиях. Это несоответствие между формулами (1) и (2) явилось причиной проведения настоящего исследования.

Изучение теплоотдачи ртути при турбулентном течении в кольцевых каналах проводилось на двух различных экспериментальных установках.

Схема установки № 1 представлена на рис. 1. Опытный участок длиной 800 мм состоял из трех

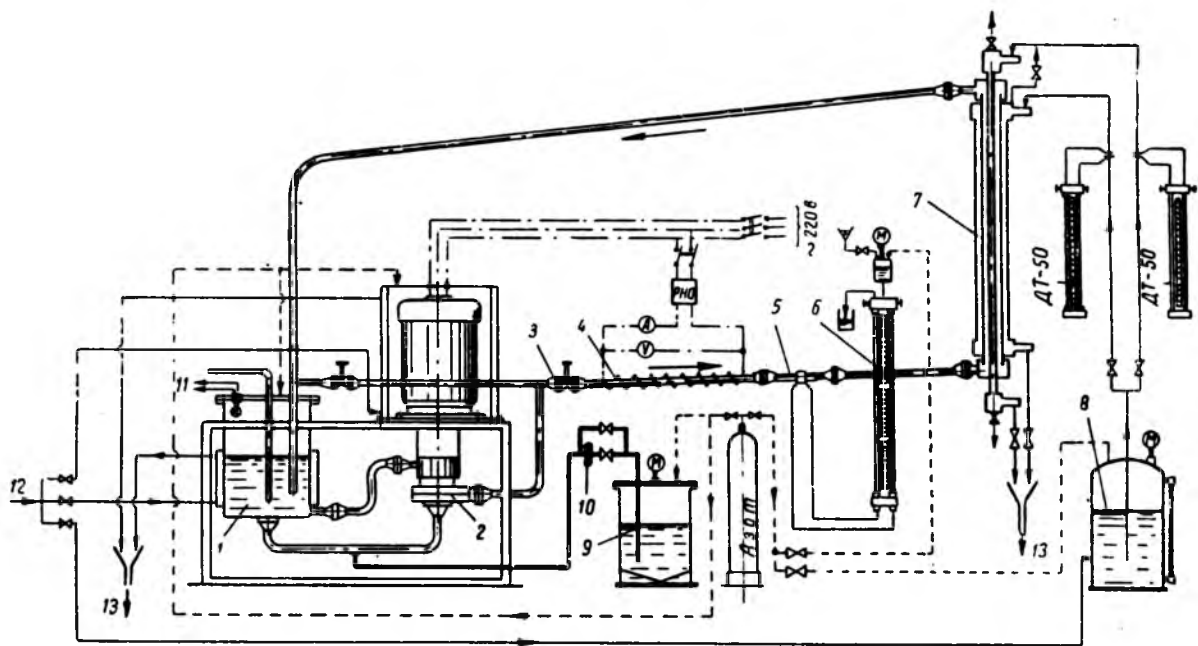


Рис. 1. Схема экспериментальной установки № 1:

1 — контейнер для ртути; 2 — циркуляционный насос; 3 — регулирующий вентиль; 4 — электрический нагреватель; 5 — расходомер; 6 — дифференциальный манометр; 7 — опытный участок; 8 — буферный бак для воды; 9 — сливной бак для ртути; 10 — фильтр; 11 — измерение уровня; 12 — охлаждающая вода; 13 — дренаж.

трубок (сталь ЭЯ1Т), вставленных одна в другую. Внутренний диаметр, средней трубки 26,9 мм, наружные диаметры двух поочередно вставленных внутренних трубок 17,3 и 13,0 мм. По внутреннему кольцевому зазору снизу вверх протекала ртуть, а по наружному зазору и по внутренней трубке сверху вниз — охлаждающая вода. Таким образом, теплоотдача ртути измерялась при одностороннем охлаждении ее изнутри или снаружи в кольцевом зазоре с отношением $d_2/d_1=1,55$ и $d_2/d_1=2,07$ при граничном условии $q_{ст}=\text{const}$. Это условие достигалось подбором в каждом опыте равенства водяных эквивалентов по ртути и воде. Внутренняя трубка вставлялась в опытный участок на сальниках с обеих сторон, что гарантировало ее от деформации при тепловом расширении и позволило поворачивать во время измерений для проверки влияния возможного эксцентриситета. Температура ртути и воды измерялась термопарами, помещенными в гильзах входных и выходных камер. Максимальный разбаланс тепла по ртути и охлаждающей воде составлял в опытах 2—4%. Температура стенок кольцевого зазора измерялась по длине 14 термопарами, заделанными в стенках в капиллярных трубках диаметрами 0,8 мм из стали ЭЯ1Т.

Для проверки надежности работы опытный участок градуировался на специальном водяном контуре.

Схема установки № 2 представлена на рис. 2. Опытный участок представлял собой трубку длиной 600 мм из стали ЭЯ1Т с наружным диаметром, равным 17,5 мм, и внутренним — 13,5 мм. Внутрь трубки вставлялся на сальниках с обеих сторон вытеснитель из трубки с наружным диаметром 8,1 мм, образующий кольцевой зазор для прохода ртути. Вытеснитель имел три узких фиксатора для устранения возможного эксцентриситета при прогибе.

Наружная трубка разделялась на 24 части узкими кольцевыми проточками для уменьшения осевых перетечек тепла. На нее наматывались последовательно электронагреватель, термомер и компенсационный нагреватель. Электронагреватели питались от стабильного источника постоянным током напряжением 130 в. Стабильность охлаждения ртути в холодильнике обеспечивалась баком постоянного уровня охлаждающей воды. Температура стенки измерялась 12 термопарами, заделанными по длине трубки. Опытный участок также градуировался на воде. Все трубки опытных участков на обеих установках тщательно калибровались и шлифовались.

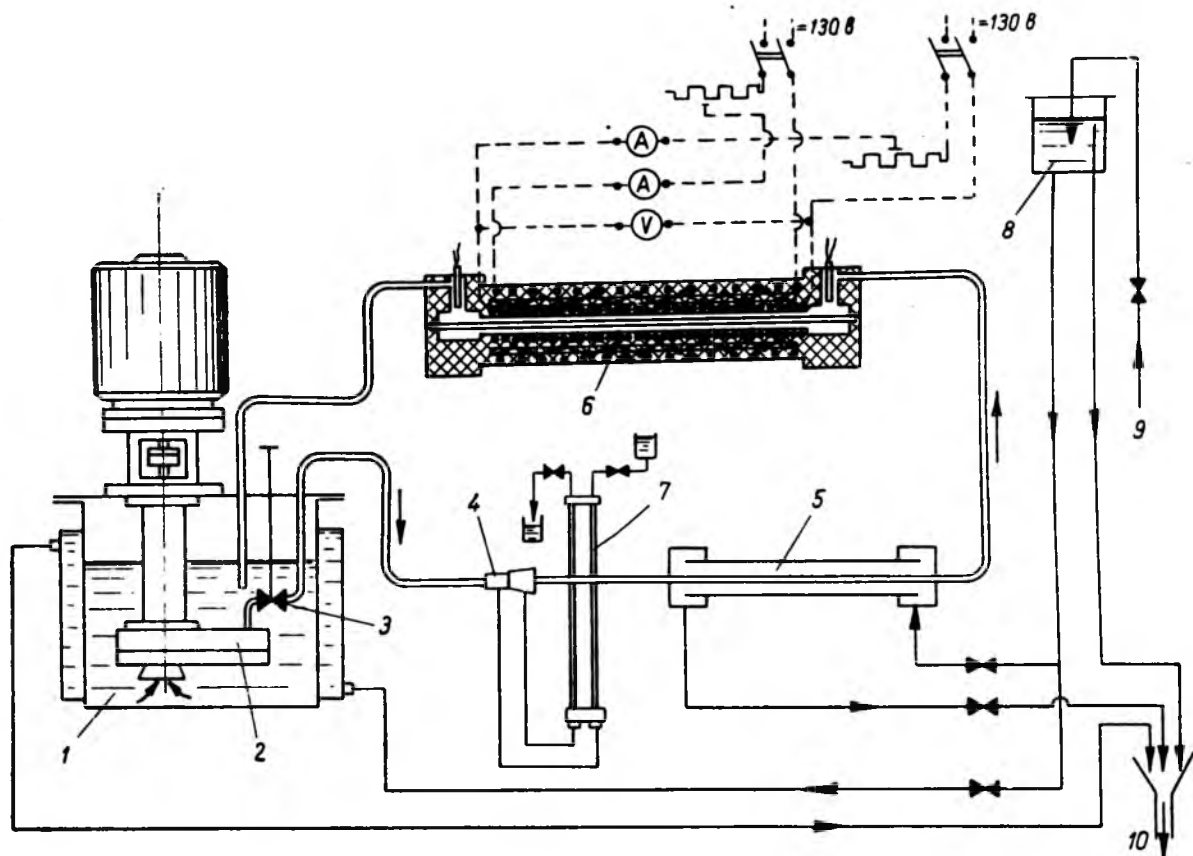


Рис. 2. Схема экспериментальной установки № 2:

1 — контейнер для ртути; 2 — циркуляционный насос; 3 — регулирующий вентиль; 4 — дроссельный расходомер; 5 — холодильник; 6 — опытный участок; 7 — дифференциальный манометр; 8 — бак постоянного уровня охлаждающей воды; 9 — подача охлаждающей воды; 10 — дренаж.

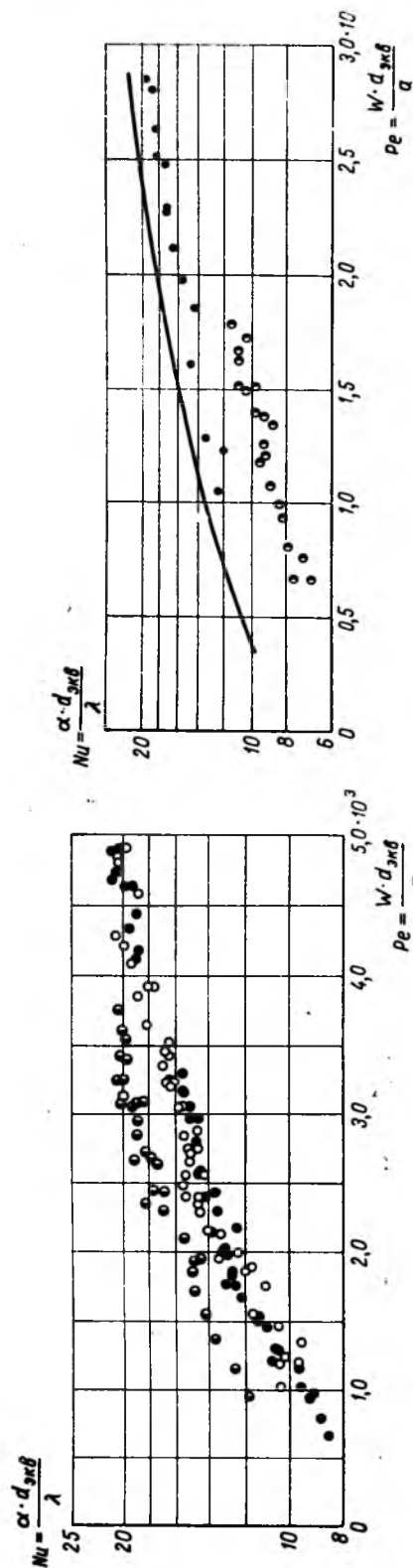


Рис. 3. Средняя теплоотдача при течении ртути в кольцевых каналах (установка № 1):

- — наружное охлаждение;
- — внутреннее охлаждение;
- — $d_2/d_1 = 1.55$
- — $l_2/d_1 = 2.07$

Рис. 4. Средняя теплоотдача при течении ртути в кольцевых каналах (установка № 2):

- формула Лайона для теплоотдачи в трубах $Lu = 7 + 0.025 Re^{0.8}$;
- — теплоотдача ртути в трубке (без внутреннего вытеснителя).

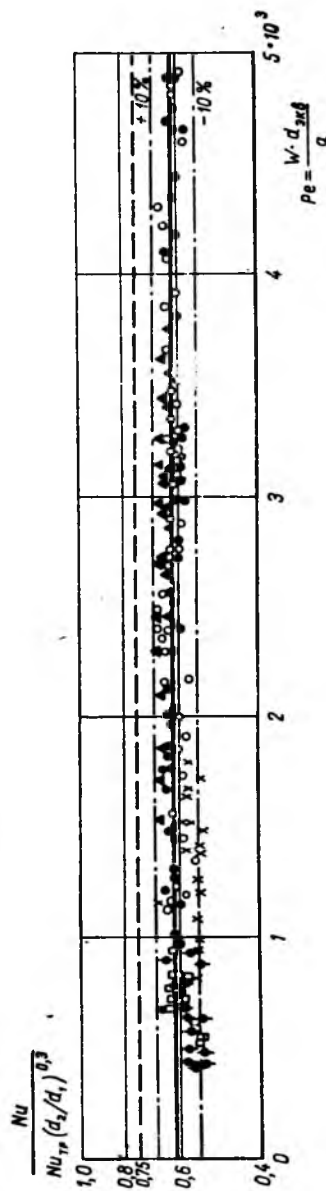


Рис. 5. Сравнение экспериментальных и теоретических данных для ртути:

- — $d_2/d_1 = 1.55$
- — $d_2/d_1 = 1.55$
- ▲ — $d_2/d_1 = 2.07$
- — $d_2/d_1 = 1.67$
- данные автора;
- $d_2/d_1 = 1.42$
- $d_2/d_1 = 1.77$
- данные работы [4].

лись. Ртуть перед заливкой в установку подвергалась химической очистке и фильтровалась.

Результаты измерений. Все опыты проводились при средней температуре ртути 30—50°С и скоростях 0,3—2,25 м/сек.

Безразмерные критерии подобия для процессов теплоотдачи, рассчитанные по гидравлическому эквивалентному диаметру, изменялись в опытах в следующих пределах:

Установка № 1

$$Re = 27 \cdot 10^3 \div 200 \cdot 10^3, \\ Pe = 670 \div 4900.$$

Установка № 2

$$Re = 15 \cdot 10^3 \div 75 \cdot 10^3, \\ Pe = 500 \div 1800.$$

На рис. 3 и 4 представлены результаты измерения теплоотдачи ртути при течении ее в кольцевых каналах в виде общепринятой зависимости $Nu = f(Pe)$, где в качестве характерного, определяющего размера выбран гидравлический эквивалентный диаметр. Из этих рисунков следует:

1) экспериментальные данные для различных $d_{\text{экв}}$ не могут быть в такой обработке представлены единой зависимостью, поэтому расчет теплоотдачи при турбулентном течении жидких металлов в кольцевых каналах по формулам для круглых труб не может дать точного результата;

2) теплоотдача в кольцевом канале для одного и того же $d_{\text{экв}}$ при наружном и внутреннем охлаждении практически одинакова.

На рис. 5 экспериментальные данные сравниваются с результатами расчета по формуле (2). Можно видеть, что расхождение опытных данных для различных $d_{\text{экв}}$ соответствует поправке $(d_2/d_1)^{0,8}$

в формуле (2). Сами данные лежат несколько ниже значений, получаемых по этой формуле для отношений d_2/d_1 , использовавшихся в измерениях. Это объясняется, по-видимому, наличием некоторого контактного термического сопротивления на границе стенки — жидкий металл.

Таким образом, до получения более точных результатов для расчета теплоотдачи тяжелых жидких металлов при турбулентном течении в каналах с кольцевым сечением можно рекомендовать формулу:

$$Nu = (4,3 + 0,015 Pe^{0,8}) \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0,3}, \quad (4)$$

которая в области чисел $Pe = 500 \div 5000$ соответствует полученным данным с точностью $\pm 10\%$.

Поступило в Редакцию 25/V 1959 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Trefethen. General Discussion on Heat Transfer. London, 1951.
2. R. Seban, D. Casey. Trans. ASME, 79, No. 7, 1514 (1957).
3. С. С. Кутателадзе, В. М. Боршанский, И. П. Новиков, О. С. Федюнский. Жидкометаллические теплоносители. Приложение № 2 к журналу «Атомная энергия». М., Атомиздат, 1958.
4. В. И. Петровичев. Сб. «Некоторые вопросы экспериментальной физики», вып. 2, 1959.
5. R. Lyon. Liquid Metals Handbook. Sec. edit, 1952.

Альbedo γ -лучей изотропных источников Co^{60} , Cs^{137} и Cr^{51} для некоторых веществ

Б. П. Булатов

В работе [1] были экспериментально определены абсолютные значения альbedo энергии γ -лучей Co^{60} и Au^{198} для различных веществ при углах падения первичного пучка 0; 45 и 60°.

В настоящей работе изучалось альbedo энергии γ -лучей, испускаемых изотропным источником, находящимся в непосредственном контакте с поверхностью рассеивателя.

Методика измерений

Абсолютное значение альbedo вычислялось как отношение суммарного потока рассеянной энергии J (Мэв/сек) к полному потоку энергии J_0 (Мэв/сек) первичного излучения, испускаемого источником в полупространство.

Схема опыта по определению угловой зависимости интенсивности рассеянного излучения приведена на рис. 1, а. Источники γ -излучения в виде цилиндров высотой и диаметром 5 мм помещались в центре рассеивателя площадью 65×65 см и практически «бесконечной» толщины [1]. В качестве источников монохроматического γ -излучения использовались радиоактивные изотопы Cr^{51} ($E_\gamma = 0,320$ Мэв), Cs^{137} ($E_\gamma = 0,661$ Мэв) и Co^{60} ($E_\gamma =$

$\approx 1,25$ Мэв). Рассеивающим материалом служили углерод, алюминий, железо и свинец.

С помощью детектора, перемещающегося по полусфере радиусом 30 см с центром в точке соприкосновения источника с поверхностью рассеивателя, измерялась плотность потока энергии γ -излучения с рассеивателем и без него. Из разности показаний определялась плотность потока энергии рассеянного излучения как функция угла α .

Энергия J суммарного потока обратно рассеянного излучения и полный поток энергии J_0 первичного γ -излучения определялись численным интегрированием соответствующих плотностей потоков энергии по всей поверхности полусферы.

Схема опыта по определению зависимости интенсивности рассеянного излучения и его спектрального состава от расстояния r между источником и детектором изображена на рис. 1, б. В центре графитового блока размерами $300 \times 300 \times 22$ см помещался источник Co^{60} в виде пластины размерами $3,1 \times 1,8 \times 0,3$ см. Детектор перемещался над поверхностью рассеивателя на высоте 5 см. Для поглощения первичного излучения использовался свинцовый экран.