

При $4 \cdot 10^{-2}$ вес.% кислорода в натрии было проведено две серии опытов. В первой серии опытов в первом ряду пучка был установлен стальной калориметр, а в седьмом — медный. Во второй серии — наоборот. Положение калориметров, принятое во второй серии опытов, сохранялось во всех остальных опытах. Это позволило сравнить теплоотдачу в первом и седьмом рядах по показаниям одного и того же калориметра. Сравнение показало, что теплоотдача в этих рядах в опытах с натрием при работе с калориметром из стали и меди совпадает. В то же время опыты с водой выявили заметную разницу в теплоотдаче указанных рядов пучка (разница около 30%).

Одинаковые значения теплоотдачи по глубине пучка в опытах с натрием следует, по-видимому, объяснить его значительной теплопроводностью (приблизительно в 100 раз большей, чем у воды). Кроме того, аналогичный результат был получен аналитическим путем (на основе теории потенциального обтекания) в работе [2], где рассчитывалась теплоотдача пучка подобного типа в средах с $Pr \ll 1$.

Между второй и третьей сериями опытов натрий в течение 24 ч чистился в холодной ловушке окислов при температуре металла на входе в ловушку 400°C и на выходе из нее $120-135^\circ\text{C}$.

Содержание кислорода в теплоносителе в третьей серии опытов составляло $2 \cdot 10^{-2}$ вес.%. Четвертая серия опытов проведена при содержании кислорода $4 \cdot 10^{-3}$ вес.%. Очистка натрия в холодной ловушке окислов от содержания кислорода $2 \cdot 10^{-2}$ до $4 \cdot 10^{-3}$ вес.% проводилась в течение 144 ч в том же режиме работы, что и во время очистки перед третьей серией опытов.

Сопоставление результатов первой — третьей серий опытов показало (см. рисунок), что в исследованном диапазоне параметров теплоотдача не меняется по глубине пучка, не зависит от содержания кислорода в натрии и материала теплоотдающей поверхности.

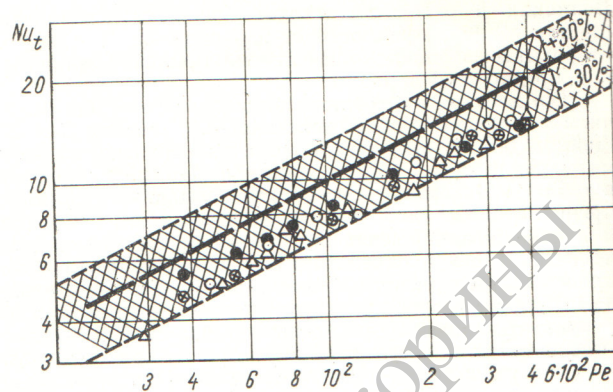
При течении натрия в трубе в аналогичном диапазоне температур потока и чисел Pe было найдено [3], что содержание кислорода в натрии ниже $2 \cdot 10^{-2}$ вес.% не влияет на теплоотдачу, а повышение до $4 \cdot 10^{-2}$ вес.% снижает ее на 3—5%. В рассматриваемом случае теплоотдача не изменяется при содержании кислорода $4 \cdot 10^{-3}$ — $4 \cdot 10^{-2}$ вес.%. Это соответствует данным, полученным в опытах при течении натрия в трубе [3], если учесть отличие обтекания поверхности нагрева поперечным потоком от продольного обтекания (отрыв пограничного слоя). Можно предположить, что в последнем случае срывающийся с поверхности поток уносит с собой часть окислов, скопившихся в пристенном слое, и тем самым уменьшается их влияние на теплоотдачу этой части поверхности.

Теплоотдача при продольном течении жидкого металла в пучках стержнями с треугольной решеткой

В. М. БОРИШАНСКИЙ, М. А. ГОТОВСКИЙ, Э. В. ФИРСОВА

УДК 621.039.517

Рассчитана теплоотдача при продольном течении жидкого металла в пучках с относительными шагами s/d , равными 1,1; 1,2 и 1,5 в диапазоне чисел $Pe = 70 \div 7000$. Результаты расчета сопоставлены с экспериментальными данными по теплоотдаче указанных



Зависимость $Nu_t = f(Pe)$:

Δ , \bullet — сталь X18H10T и медь соответственно ($4 \cdot 10^{-2}\%$ O_2); \circ — сталь X18H10T ($2 \cdot 10^{-2}\%$ O_2); \otimes — сталь X18H10T ($4 \cdot 10^{-3}\%$ O_2); — — — — — $Nu_t = Pe^{0,5}$

На рисунке заштрихована область расположения всех известных в литературе опытных точек по теплоотдаче пучков труб различной конфигурации в поперечном потоке жидких металлов. Эти данные в работах [1, 4] с точностью $\pm 30\%$ обобщены одной формулой $Nu_t = Pe^{0,5}$. Результаты настоящего исследования показали, что эта формула распространяется и на среднюю теплоотдачу шахматного пучка с относительными шагами $\frac{s_1}{d} = 1,25$ и $\frac{s_2}{d} = 1,07$. Этот факт соответствует

известным экспериментальным и теоретическим работам, в которых отмечается вторичное влияние геометрии пучка на интенсивность теплоотдачи при обтекании пучков труб поперечным потоком жидкого металла.

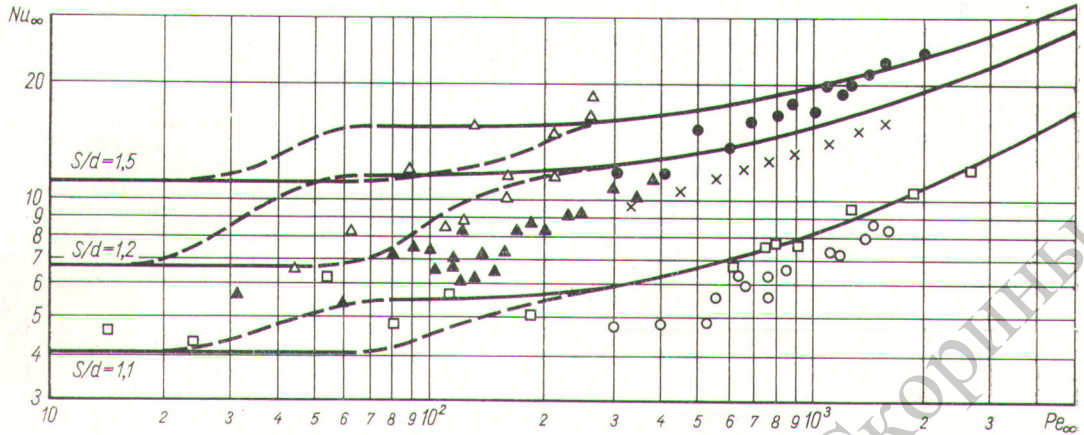
Поступило в Редакцию 25/VI 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Боришанский и др. В сб. «Жидкие металлы. Под ред. В. М. Боришанского и др. М., Госатомиздат, 1963, стр. 183.
2. R. Cess, R. Crosh. Trans. ASME, 80, 677 (1958).
3. В. М. Боришанский, Т. В. ЗаблOCKая, И. И. Иващенко. «Атомная энергия», 14, 320 (1963).
4. В. М. Боришанский, А. А. Андреевский, В. Б. Жинкина. «Атомная энергия», 13, 269 (1962).

пучков для теплоносителей с числами Pr , равными 0,007 и 0,03.

Уравнение стабилизированного теплообмена в бесконечном пучке труб, расположенных по решетке равностороннего треугольника, записывается в безразмер-



Зависимость Nu от Pe (определяющий размер — гидравлический диаметр ячейки):

△ — $s/d = 1,5$, $Pr = 0,007$; ▲ — $s/d = 1,2$, $Pr = 0,007$; □ — $s/d = 1,15$, $Pr = 0,013 \div 0,033$;
● — $s/d = 1,5$, $Pr = 0,03$; × — $s/d = 1,2$, $Pr = 0,03$; ○ — $s/d = 1,1$, $Pr = 0,026$.

ном виде:

$$\frac{1}{\xi} \cdot \frac{\partial}{\partial \xi} \left(1 + \frac{a_T}{a} \right) \frac{\partial \theta}{\partial \xi} + \frac{1}{\xi^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(1 + \frac{a_T}{a} \right) \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} = Q^2 \omega, \quad (1)$$

где $\xi = \frac{r}{R}$ — безразмерная радиальная координата;
 φ — полярный угол;

$$Q = \frac{d}{d_r} = \frac{1}{\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left(\frac{s}{d} \right)^2 - 1}$$

(здесь $d = 2R$; d_r — гидравлический диаметр бесконечного пучка); a — коэффициент температуропроводности; a_T — коэффициент турбулентной температуропроводности; $\theta = \frac{T\lambda}{qd_r}$ — безразмерная температура (здесь T — температура, λ — коэффициент теплопроводности, q — удельный тепловой поток на стенке); $\omega = \frac{w}{\bar{w}}$ — безразмерное поле скоростей, отнесенное к средней (по расходу) скорости.

Граничные условия к уравнению (1) имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} = 0 \Big|_{\varphi=0^\circ; \varphi=30^\circ} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \cos \varphi - \frac{\sin \varphi}{\xi} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} = 0 \Big|_{\xi = \frac{s}{2 \cos \varphi}} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = -\frac{Q}{2} \Big|_{\xi=1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Распределение скоростей рассчитывалось с помощью метода, предложенного в работе [1]. Для аппроксимации функции a_T/a были использованы соображения, высказанные в работах [2, 3]:

$$\frac{a_T}{a} = kPe_f(\xi, \varphi), \quad (3)$$

где

$$f(\xi, \varphi) = f(\eta).$$

Здесь

$$\frac{1}{\eta} = \frac{1}{\xi_1 - 1} + \frac{1}{\xi_2 - 1} + \frac{1}{\xi_3 - 1}. \quad (4)$$

При использовании в качестве характерного размера в числе Pe гидравлического диаметра зависимость (3) примет вид

$$\frac{a_T}{a} = 8 \cdot 10^{-3} Pe Q \eta. \quad (5)$$

Интегрирование уравнения (1) с указанными граничными условиями (2) при подстановке в него зависимости (5) и безразмерной скорости, полученной методом работы [1], проводилось на электронно-вычислительной машине «Урал-2»*. Уравнение (1) записывалось в конечных разностях по пятиточечной схеме. Система линейных уравнений решалась методом, предложенным в работе [4].

Рассчитанные значения чисел $Nu = F(Pe)$ при относительных шагах s/d , равных 1,1; 1,2; 1,5, и для чисел $Pr = 0,03$ и $0,007$ приведены на рисунке. Здесь же даны экспериментальные данные по теплоотдаче в области стабилизации для пучков с соответствующими шагами, полученные для теплоносителей с $Pr = 0,03$ и $Pr = 0,007$.

Геометрические параметры рабочих участков приведены в таблице. Методика проведения опытов описана в работах [5–7].

Сравнение, приведенное на рисунке, показывает, что зависимость теплоотдачи от относительного шага, полученная в результате расчета, близка к экспериментальным данным. Абсолютные значения экспериментальных коэффициентов теплоотдачи несколько меньше расчетных. Лучшее совпадение наблюдается для пучка с $s/d = 1,5$.

Наибольшее отклонение отмечено для пучка с $s/d = 1,1$, однако при последующем осмотре экспериментального участка выяснилось, что в нем была

* Расчет выполнен в Вычислительном отделе ЦКТИ А. З. Серазетдиновым, Т. И. Литвиновой под руководством Л. А. Дорфмана.

Параметры рабочих участков

Номер пучка	Число труб в пучке	Диаметр труб, мм	Относительный шаг	Гидравлический диаметр	Диаметр обечайки пучка с вытеснителями, мм
Пучок 1	7	22	1,1	7,25	75
Пучок 2	7	22	1,2	12,84	83
Пучок 3	7	22	1,5	32,4	96

нарушена геометрия. Поэтому на рисунке приведены также данные Физико-энергетического института для пучка с $s/d = 1,1$ [8].

Таким образом, выполненные расчет и эксперимент дают возможность уточнить ранее предложенные в работе [6] формулы в отношении влияния относительного шага на теплоотдачу при продольном обтекании.

Поступило в Редакцию 10/XI 1966 г.

Экспериментальное изучение неравномерности потока тепловых нейтронов на поверхности поглощающего образца с помощью калориметрического устройства

В. С. КАРАСЕВ, В. М. КОЛЯДА

УДК 539.125.52

Исследование тепловых характеристик, термических напряжений, радиационных эффектов облучаемых устройств, содержащих поглощающие и делящиеся материалы, обычно проводится в вертикальных каналах отражателя реактора, где поток тепловых нейтронов максимальный. Так, в реакторе ВВР-М Института физики АН УССР отношение максимального потока тепловых нейтронов в отражателе $\Phi_{отр}$ к среднему потоку в активной зоне $\Phi_{a,z}$ составляет 1,41 [1].

Неравномерность потока тепловых нейтронов в высоконапряженных реакторах наблюдается при переходе от одной точки к другой как по высоте, так и в горизонтальном направлении. Величина неравномерности обусловлена конфигурацией загрузки топлива в активной зоне, краевыми эффектами, влиянием регулирующих стержней и некоторыми другими факторами [1].

Однако градиенты нейтронного потока существуют также в каждой точке реактора при переходе от одного направления к другому, причем неравномерности, особенно в области отражателя, могут быть весьма заметными.

Поэтому при облучении устройств с поглощающими и делящимися материалами разные части образцов в неодинаковой степени облучаются потоком тепловых нейтронов, в связи с чем термические и радиационные эффекты могут отличаться в несколько раз и, следовательно, должны строго учитываться [2]. Относительное распределение потока тепловых нейтронов по высоте облучаемой ампулы обычно известно, но градиент поля тепловых нейтронов в радиальном направлении не измеряется.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Deissler, M. Teilor. Reactor Heat Transfer Conference. N. Y., 1956, p. 416.
2. В. М. Боришанский, Т. В. Заблочкая. Теплообмен и гидродинамика в элементах энергооборудования. «Труды ЦКТИ». Кн. 73, 1966, стр. 5.
3. В. И. Субботин, М. Х. Ибрагимов, Е. В. Номофилов. «Теплофизика высоких температур», 3, 421 (1965).
4. Н. И. Булеев. Доклад № 329, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
5. В. М. Боришанский, Э. В. Фирсова. «Атомная энергия», 14, 584 (1963).
6. В. М. Боришанский, Э. В. Фирсова. «Атомная энергия», 16, 457 (1964).
7. В. М. Боришанский, Э. В. Фирсова. В сб. «Конвективная теплопередача в двухфазном и однофазном потоках». Под ред. В. М. Боришанского, И. И. Патева, М., «Энергия», 1964, стр. 377.
8. В. И. Субботин и др. Доклад № 328, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).

В настоящей работе неравномерность потока тепловых нейтронов на поверхности поглощающего образца в канале бериллиевого отражателя измерялась при помощи изотермического калориметра с электрокомпенсацией [3]. Методика измерения состоит в том, что определяется величина тепловыделения в небольшом цилиндрическом образце, содержащем смесь $U^{235} + C$, который окружен слоем кадмия со всех сторон, кроме одной, определенным образом выбранной (рис. 1). Поток тепловых нейтронов, попадающий на не защищенную кадмием сторону образца, создает мощное тепловыделение в U^{235} за счет реакции деления, прямо пропорциональное потоку тепловых нейтронов. При этом, естественно,

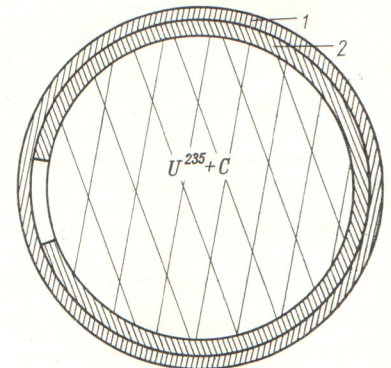


Рис. 1. Калориметрический образец:
1 — контейнер;
2 — кадмий.