

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Могильнер. «Атомная энергия», 21, 127 (1966).
2. А. И. Могильнер. См. настоящий выпуск, стр. 78.
3. А. И. Лейпунский и др. Physics of Fast and Intern. Reactors. Vienna, IAEA, 1962, p. 327.
4. А. И. Могильнер и др. «Атомная энергия», 22, 46 (1967).
5. Reactor Kinetics and Control. TID-7662, 1964, p. 334.

## Теплоотдача к органическим теплоносителям

Ю. П. Шлыков, А. Д. Леонгардт

УДК 621.039.534.7:621.039.517.3

Исследование турбулентного теплообмена в трубах с учетом зависимости теплофизических свойств жидкости от температуры представляет весьма актуальную задачу, особенно в связи с возможностью применения высококипящих органических жидкостей в качестве теплоносителей в ядерных энергетических установках.

Как известно, коэффициенты теплоотдачи к органическим жидкостям обычно малы, поэтому при высоких тепловых нагрузках, реализуемых в энергетических реакторах, возникают большие перепады температур между температурой в ядре потока и температурой у стенки. В этих условиях физические свойства жидкости (особенно вязкость) по сечению потока существенно изменяются и оказывают большое влияние на теплоотдачу. При расчетах теплоотдачи, к точности которых в ядерной энергетике предъявляются повышенные требования, необходимо учитывать указанные особенности. Однако отсутствие достаточно надежных теоретических разработок в этом направлении приводит к появлению различных чисто эмпирических расчетных зависимостей, соответствующих весьма узкой области изменения определяющих параметров. В особенности это относится к органическим жидкостям [1, 2].

Обратимся к теоретическому анализу теплообмена с учетом переменности физических свойств жидкости по сечению потока. Многие капельные жидкости в состояниях, не близких к критическому, в зависимости от температуры значительно изменяют только вязкость. В этом случае для расчета безразмерного коэффициента теплоотдачи можно воспользоваться известным интегральным соотношением [3], которое при равенстве турбулентного числа Прандтля единице принимает вид

$$Nu \approx 2 \left[ \int_0^1 \frac{R^3 dR}{1 + Pr \frac{\varepsilon_\tau}{\nu}} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $R = \frac{r}{r_0}$  ( $r_0$  — радиус трубы,  $r$  — текущий радиус);  $\nu$  — местное значение кинематической вязкости. Основная сложность решения этого уравнения состоит в том, что величина коэффициента турбулентного переноса  $\varepsilon_\tau$  для неизотермического течения совершенно не изучена. В отношении определения его величины можно сделать некоторые предположения, нуждающиеся в экспериментальной проверке. Этот вопрос рассматривался в работах [4–6], в которых предполагалось, что коэффициент турбулентного переноса зависит от местных значений параметров жидкости в данной точке, а не от степени изменения этих параметров в ее окрестностях. Такое допущение используется и в настоящем исследовании.

Введем «неизотермические» обобщенные координаты ( $y^{++}$ ,  $u^{++}$ ), определяемые следующим образом:

$$y^{++} = \frac{y\nu^*}{\nu}; \quad u^{++} = \frac{u}{\nu^*}, \quad (2)$$

где  $\nu^* = \sqrt{\nu \text{ grad } u_0}|_{\text{ст}}$  — «местная» динамическая скорость ( $u_0$  — скорость изотермического течения на расстоянии от стенки  $y$ ).

Предположим, что в новой системе координат ( $u^{++}$ ,  $y^{++}$ ) безразмерный профиль скорости неизотермического течения совпадает с обобщенным изотермическим профилем, т. е.

$$u^{++} = f(y^{++}) \quad \text{и} \quad u_0^+ = f(y^+). \quad (3)$$

Последние равенства свидетельствуют о том, что для расчетов коэффициента турбулентного обмена при неизотермическом течении можно воспользоваться формулами для изотермического потока, если произвести замену переменных  $u^+$  и  $y^+$  на  $u^{++}$  и  $y^{++}$ . Легко установить связь между изотермическими и неизотермическими координатами:

$$y^{++} = y^+ \sqrt{\frac{\nu_0}{\nu}} \quad \text{и} \quad u^{++} = u^+ \sqrt{\frac{\nu_0}{\nu}}, \quad (4)$$

где  $\nu_0$  — кинематическая вязкость при температуре на оси потока.

В качестве изотермической зависимости для коэффициента турбулентного обмена воспользуемся соотношением, полученным в работе [7], которое имеет вид

$$\frac{\varepsilon_{\tau 0}}{\nu_0} = k^2 (y^+)^2 \left[ 1 - \exp \left( -A \frac{y^+}{y_{\max}^+} \right) \right]^2 \frac{du_0^+}{dy^+}, \quad (5)$$

где  $k = 0,36$  — константа турбулентности;  $y^+ = \frac{y v_0^*}{\nu_0}$  ( $v_0^*$  — динамическая скорость);  $y_{\max}^+ = \frac{1}{2} Re_{\text{ж}} \sqrt{\frac{\xi_0}{8}}$  ( $\xi_0$  — коэффициент гидравлического сопротивления);  $A = \frac{y_{\max}^+ - 60}{22}$ . (Индекс «0» соответствует изотермическому течению или течению с теплообменом при постоянных физических свойствах, а индекс «ж» указывает на то, что теплофизические параметры принимаются при средней температуре жидкости.)

Расчеты теплоотдачи при постоянных физических свойствах жидкостей, проведенные по формуле (1) с использованием соотношения (5), для различных чисел Прандтля ( $Pr < 100$ ) и Рейнольдса с достаточной точностью могут быть представлены интерполяционным уравнением

$$Nu_0 = C Re_{\text{ж}}^{0,8} Pr_{\text{ж}}^n, \quad (6)$$

где коэффициенты  $C$  и  $n$  принимают следующие значения:

| $1 \leq Pr_{\text{ж}} \leq 5$ | $5 \leq Pr_{\text{ж}} \leq 10$ | $10 \leq Pr_{\text{ж}} \leq 30$ | $Pr_{\text{ж}} > 30$      |
|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| $C = 0,0231$<br>$n = 0,45$    | $C = 0,0246$<br>$n = 0,42$     | $C = 0,029$<br>$n = 0,35$       | $C = 0,0347$<br>$n = 0,3$ |

Для расчета теплоотдачи при переменной вязкости по изложенной методике определения коэффициента турбулентного переноса помимо задания величины теплового потока на стенке  $q_w$  необходимо знать распределение вязкости по сечению потока, что предопределяет проведение расчетов методом последовательного приближения. В качестве первого приближения используется распределение температур, получаемое из расчета в предположении постоянства физических свойств среды. Практика показала, что для получения точности в пределах 3% достаточно трех приближений. Результаты расчета дали возможность ввести аппроксимирующую функцию, отражающую зависимость между  $y^+$  и  $y^{++}$  в широком диапа-

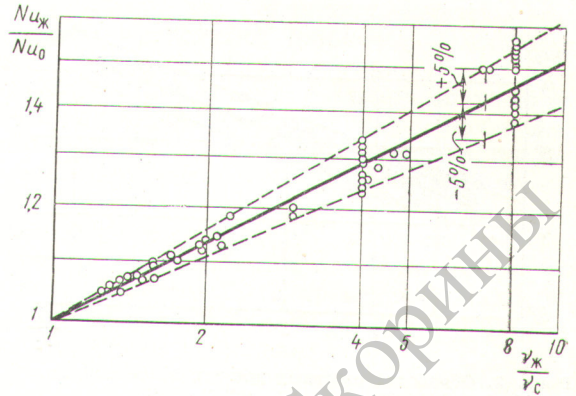


Рис. 1. Зависимость теплоотдачи при переменной вязкости жидкости от параметра неизотермичности (теоретический расчет).

зоне изменений чисел  $Re$  и  $Pr$ . Эта функция имеет вид

$$y^{++} = y^+ \left( \frac{\nu_{\text{ж}}}{\nu_{\text{с}}} \right)^{k/2}, \quad (7)$$

где  $\nu_{\text{ж}}$  и  $\nu_{\text{с}}$  — соответственно кинематическая вязкость при температуре жидкости и стенки;  $k = \exp \left( Pr^{0,5} A \frac{y^+}{y_{\max}^+} \right)$ .

Функция (7) выбрана таким образом, что число Прандтля в знаменателе формулы (1) принимается постоянным и равным  $Pr_{\text{ж}}$ . Многочисленные расчеты теплоотдачи, проведенные по указанной методике с использованием ЭЦВМ и представленные на рис. 1, показывают, что влияние неизотермичности (изменения вязкости с температурой по сечению потока) при нагреве может быть учтено с помощью параметра неизотермичности  $\nu_{\text{ж}}/\nu_{\text{с}}$  в степени 0,18, т. е. формула для расчета теплоотдачи при переменной вязкости должна иметь вид

$$Nu_{\text{ж}} = Nu_0 \left( \frac{\nu_{\text{ж}}}{\nu_{\text{с}}} \right)^{0,18}. \quad (8)$$

Обработка опытных данных авторов [8] по теплоотдаче к воде и органическим жидкостям и данных работы [9] в виде зависимости  $\frac{Nu_{\text{ж}}}{Nu_0} = \varphi \left( \frac{\nu_{\text{ж}}}{\nu_{\text{с}}} \right)$ , представленной на рис. 2, полностью подтвердила теоретическую зависимость (8). С учетом соотношения (6) уравнение (8) записывается следующим образом:

$$Nu_{\text{ж}} = C Re_{\text{ж}}^{0,8} Pr_{\text{ж}}^n \left( \frac{\nu_{\text{ж}}}{\nu_{\text{с}}} \right)^{0,18}. \quad (9)$$

Обработка новейших данных по теплоотдаче показала, что подавляющее большинство опытных точек обобщается зависимостью (9) с точностью до 5% (рис. 3). Формула (9) про-

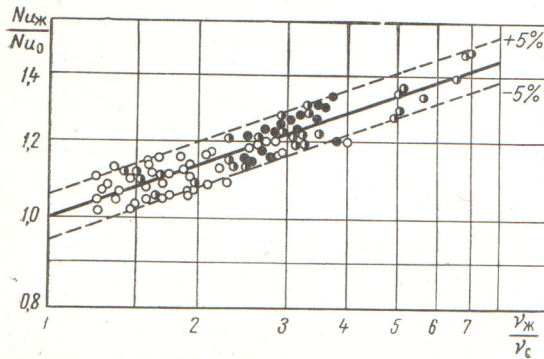


Рис. 2. Обработка опытных данных по теплоотдаче в виде зависимости  $Nu_{жк}/Nu_0$  от  $v_{жк}/v_0$ :

● и ● — данные авторов [8]; ○ — данные работы [9].

верена экспериментально в следующем диапазоне изменения определяющих параметров:  $3 \leq Pr_{жк} \leq 75$ ;  $2 \cdot 10^4 \leq Re_{жк} \leq 30 \cdot 10^4$ ;  $1 < \frac{v_{жк}}{v_0} \leq 7$ .

Предложенный в настоящей статье метод определения коэффициента турбулентного переноса тепла для неизотермического течения может быть применен и для случая изменения всех теплофизических параметров жидкости.

Поступила в Редакцию 8/IV 1967 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. M. Silberberg, O. Huber. Heat transfer characteristics of polyphenyl reactor colants. Report of the American Inst. of Chem. Eng., 1957.
2. F. Lanza, R. Ricque, J. Villeneuve. Third United Nat. Internat. Conf. on Peaceful uses of Atomic Energy, 1964, Rep. 28/P-93.

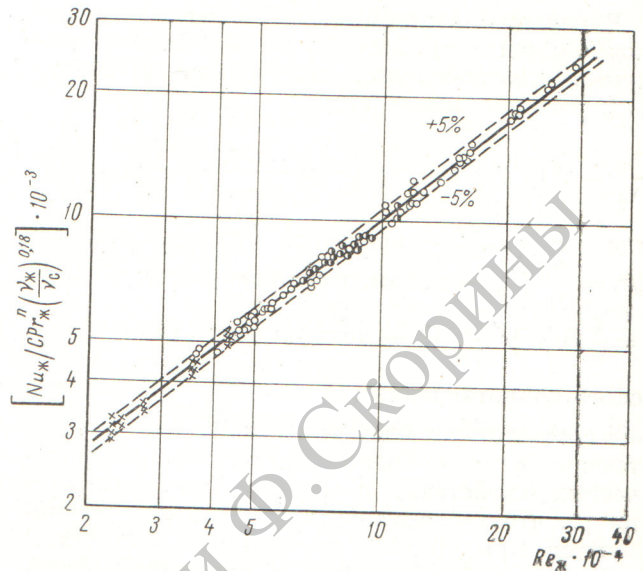


Рис. 3. Обобщенная обработка опытных данных по теплоотдаче при переменных физических свойствах; ○ и ● — данные авторов [8] (вода, ПАВ); × — данные работы [9] (масла).

3. С. С. Кутателадзе. Основы теории теплообмена. М., Машгиз, 1962.
4. R. Deissler. NASA, Rep. 1210, 1955.
5. Хесс и Рунд. «Теплопередача», № 1, 49 (1965).
6. K. Goldman. Chem. Engng Progr. Sympos. Series. Nucl. Engng, Part III, 50, No. 11 (1954).
7. W. Gill, M. Scher. A. I. Ch. E. Journal, 7, No. 1 (1961).
8. Ю. П. Шлыков, А. Д. Леонгардт. «Тр. ЦКТИ», вып. 73 (1966).
9. J. Malina, E. Sparrow. Chem. Engng Sci., 19, 953 (1964).

## Влияние облучения на магнитные свойства упорядочивающегося сплава Ni<sub>3</sub>Fe

П. Л. ГРУЗИН, Ю. С. ХАРЛАМОВ

УДК 621.039.553:538.21

Изучению влияния радиационных дефектов на свойства упорядочивающихся сплавов посвящено значительное число работ. Этот интерес обусловлен, во-первых, высокой чувствительностью физических и механических свойств этих сплавов к степени порядка. Во-вторых, возникновение в этих сплавах радиационных дефектов в некоторых случаях существенно изменяет степень упорядоченности решетки. В проведенных исследованиях применялось сложное по спектральному составу облучение. Детали механизма воздействия ядерных излучений на твердое тело не выяснены. С этой

точки зрения особый интерес представляет использование однородного излучения.

Настоящая работа посвящена изучению воздействия облучения нейтронами, осколками деления урана и продуктами реакции  $B^{10}(\alpha, n) Li^7$  на магнитные свойства упорядочивающегося сплава Ni — Fe, по составу близкого к сверхструктуре Ni<sub>3</sub>Fe. Магнитные свойства этого сплава весьма чувствительны к степени порядка [1], поэтому было интересно выяснить возможности использования метода измерения магнитных свойств для изучения природы радиационных повреждений.