

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

I. V. Kuraeva, V. S. Protopopov, О средних коэффициентах сопротивления трения при турбулентном течении жидкости сверхкритического давления в горизонтальных круглых трубах, *TVT*, 1974, Volume 12, Issue 1, 218–220

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use
<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.88

January 15, 2025, 05:36:12



О СРЕДНИХ КОЭФФИЦИЕНТАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕНИЯ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КРУГЛЫХ ТРУБАХ

И. В. Кураева, В. С. Протопопов

Исследованию процессов теплообмена при сверхкритическом давлении посвящено много работ (см., например, [1-4]). Закономерности же гидравлического сопротивления трения остаются практически мало изученными. Известны только две экспериментальные работы [5, 6], выполненные с водой, в которых исследовались средние для обогреваемой трубы коэффициенты сопротивления трения. Между тем, как отмечается в [6, 7], потери давления на трение составляют значительную долю в суммарном перепаде давления в обогреваемой трубе, и погрешности в определении величины коэффициента сопротивления трения ξ может привести к существенным ошибкам при проведении гидравлических расчетов.

Для инженерных расчетов в [5] на основании опытов с водой сверхкритического давления, проведенных в вертикальных трубах при небольших температурных напорах, предложена эмпирическая зависимость

$$\xi = \xi_0 (\mu_c / \mu_{ж})^{0,22}, \quad (1)$$

где ξ_0 — коэффициент сопротивления трения при постоянных физических свойствах; μ_c и $\mu_{ж}$ — динамические коэффициенты вязкости, соответствующие температуре стенки t_c и среднemasсовой температуре жидкости $t_{ж}$. Попытки рассчитать теоретически коэффициенты сопротивления для рассматриваемых условий оказались не вполне успешными. Так, в [8] показано, что при использовании среднеинтегральных по сечению трубы плотности и вязкости результаты расчета сопротивления по формуле для изотермического течения качественно согласуются с экспериментальными данными [5], однако наблюдается систематическое занижение расчетных величин. Аналогичное занижение наблюдается также при использовании расчетной зависимости из теоретической работы [9].

В предлагаемой работе анализируются средние коэффициенты сопротивления трения ξ , полученные при турбулентном течении двуокиси углерода сверхкритического давления в обогреваемой горизонтальной трубе, в условиях больших температурных напоров между стенкой и жидкостью [10, 11]. Диаметр трубки $d=4,08$ мм, длина обогреваемой части $l=208$ мм, длина успокоительного предвключенного участка 200 мм. Опыты проводились при $p \approx 80$ и ~ 100 бар ($p/p_k=1,06$ и $1,33$), $Re \approx \rho w d / \mu_{ж} = (0,8-4,5) \cdot 10^5$ ($\rho w = 1140-7400$ кг/м²сек), $t_{ж} = 19-88^\circ$ С, t_c до 500° С, плотности теплового потока на стенке q_c до $2,5 \cdot 10^6$ вт/м² и $q_c / \rho w$ до $0,635$ кдж/кг. Для большинства опытов $t_{ж} < t_m$ (t_m — псевдокритическая температура), а температура стенки вдоль трубы интенсивно, но монотонно увеличивалась*.

Для определения коэффициентов сопротивления в опытах измерялся перепад давления на обогреваемой трубке Δp . Измерения Δp проводились с помощью дифференциального манометра ДТ-150, заполненного ртутью. Величина Δp в опытах составляла $(1,4-37) 10^3$ н/м². Подробное описание экспериментальной установки и условий проведения опытов изложено в работах [10, 11]. В предварительных опытах, проведенных с водой при атмосферном давлении и с двуокисью углерода при давлении ~ 100 бар в изотермических условиях, было получено, что при числах Рейнольдса $Re < 10^5$ значения коэффициента сопротивления трения согласуются с расчетом по формуле Филоненко $\xi_0 = (1,82 \lg Re - 1,64)^{-2}$, а при $Re > 10^5$ его значение постоянно и равно $\xi_0 = 0,020$.

При течении в обогреваемой трубе физические свойства жидкости сильно меняются как по сечению трубы, так и вдоль потока. Вследствие этого будет иметь место изменение местных коэффициентов сопротивления трения вдоль обогреваемой трубы. Проведенные измерения позволяют определить лишь средние по длине трубы значения коэффициента сопротивления трения ξ . Значения ξ вычислялись по формуле**

$$\xi = \left[\Delta p - (\overline{\rho w})^2 \left(\frac{1}{\rho_{вых}} - \frac{1}{\rho_{вх}} \right) \right] \frac{2\rho d}{(\overline{\rho w})^2 l}. \quad (2)$$

* Согласно оценкам, выполненным по приближенным методам расчета начала местного ухудшения теплоотдачи [12-14], часть этих опытов при больших температурных напорах относится к режимам ухудшенного теплообмена.

** Формула (2) следует из одномерной модели течения. При этом учитываются потери давления на ускорение потока (см., например [15]).

Здесь Δp — измеряемый перепад давления; \bar{w} — средняя массовая скорость; $\rho_{\text{вх}}$ и $\rho_{\text{вых}}$ — значения плотности жидкости на входе и выходе из трубы; $\bar{\rho}$ — среднеинтегральная величина плотности жидкости в трубе, определяемая выражением

$$\bar{\rho} = \left[\frac{1}{l} \int_0^l \frac{dx}{\rho(x)} \right]^{-1}. \quad (3)$$

Этому значению плотности $\bar{\rho}$ соответствует некоторое среднее для обогреваемой трубы значение температуры жидкости $\bar{t}_ж$ [16], по которому определялись далее физические свойства жидкости. Для каждого опыта по тарировочной зависимости $\xi_0 = \xi_0(\text{Re})$ определялась величина коэффициента сопротивления трения ξ_0 в изотермических условиях, где $\text{Re} = \bar{w} d / \bar{\mu}_ж$.

На рис. 1 представлены результаты обработки опытных данных в виде $\bar{\xi} / \xi_0 = f(\bar{\mu}_ж / \mu_c)$. Значение $\bar{\mu}_ж$ определялось по температуре $\bar{t}_ж$, а μ_c — по средней температуре стенки трубы

$$\bar{t}_c = \frac{1}{l} \int_0^l t_c(x) dx. \quad (4)$$

Сплошной линией представлена зависимость, соответствующая расчету по (1). Как видно, опытные точки в такой обработке располагаются в основном выше этой зависимости*. Увеличение гидравлического сопротивления при больших температурных напорах отмечалось и в других работах, например [17]. Однако при этом наблюдались пульсационные режимы улучшенной теплоотдачи. Увеличение сопротивления трения в этих работах, по-видимому, связано с развитием колебательных процессов. В наших опытах колебания давления не отмечались. Кроме того, расчеты, проведенные по методике, изложенной в [18], показали, что условия наших опытов существенно отличаются от условий, при которых возможно развитие резонансных колебаний давления в контуре. Можно предположить так же, как и в [6], что относительное увеличение сопротивления связано с возникновением конвективных токов в поперечном сечении горизонтальной трубы под влиянием свободной конвекции. По имеющимся данным, свободная конвекция оказывает влияние на теплоотдачу в горизонтальных трубах даже при малых значениях диаметра трубы [12, 19]. Это влияние проявляется прежде всего в изменении температуры стенки трубы по окружности, а также, по-видимому, начинает сказываться и на значениях средних по периметру трубы коэффициентов теплоотдачи. Так, по данным [12], при течении в горизонтальной трубе $d = 4,28$ мм теплоотдача в условиях, близких к рассматриваемым в настоящей работе, была в среднем на 20% выше, чем при вертикальном подъемном течении.

Анализируя относительное отклонение опытных точек от зависимости (1), эмпирическим путем удалось установить, что влияние свободной конвекции на сопротивление трения можно учесть с помощью комплекса $\text{Gr}/\text{Re}^2 = (1 - \bar{\rho}_c / \bar{\rho}_ж) g d \bar{\rho}_ж^2 / (\rho w)^2$. Зависимость $(\bar{\xi} / \xi_0) (\bar{\mu}_ж / \mu_c)^{0,22} = f(\text{Gr}/\text{Re}^2)$ показана на рис. 2. Как видно, опытные точки при $\text{Gr}/\text{Re}^2 < 5 \cdot 10^{-4}$ соответствуют зависимости (1). Начиная же с $\text{Gr}/\text{Re}^2 \approx 5 \cdot 10^{-4}$ наблюдается относительное увеличение коэффициентов сопротивления трения по мере увеличения комплекса Gr/Re^2 . При максимальном из достигнутых в наших опытах значениях $\text{Gr}/\text{Re}^2 = 10^{-2}$ относительное увеличение $\bar{\xi}$ составляет в среднем 35%. На рис. 2 нанесены также точки для воды при $t_ж < t_m$ ($p = 230$ бар) по данным работы [6] для горизонтальной трубы диаметром $d = 19,9$ мм. В [6] опытные данные представлены графически и не содержат сведений о температуре стенки. Значения t_c были получены расчетным путем для приведенных в [6] условий опыта по формуле для коэффициентов теплоотдачи из работы [11]. При этом теплофизические свойства воды определялись по [20]. Как видно, для этих опытов значения

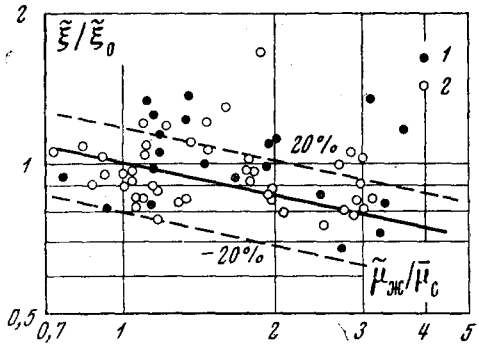


Рис. 1. Сравнение средних коэффициентов сопротивления трения для двуокиси углерода с расчетом по формуле (1):

1 — $p = 80$ бар; 2 — 100

* Точки при $\bar{\mu}_ж / \mu_c < 1$ соответствуют опытам $t_ж > t_m$.

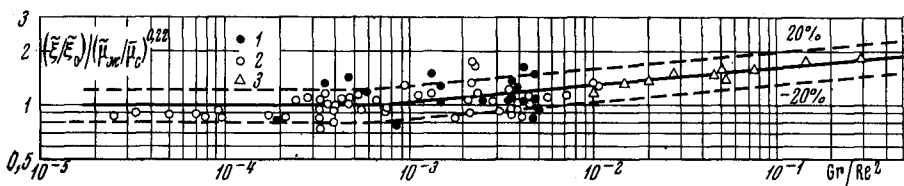


Рис. 2. Влияние свободной конвекции на коэффициент сопротивления трения при турбулентном течении в горизонтальных трубах:

1 — $p=80$ бар; 2 — 100 бар (двуокись углерода); 3 — 230 бар (вода [6])

Gr/Re^2 больше, чем в наших опытах, и соответственно больше относительное увеличение $\tilde{\xi}$ по сравнению с (1) (почти вдвое при максимальном значении $Gr/Re^2 = 3 \cdot 10^{-1}$). Видно также, что на рисунке точки как для двуокиси углерода, так и для воды обнаруживают одинаковую зависимость коэффициентов сопротивления трения от комплекса Gr/Re^2 .

Результаты проведенной обработки опытных данных можно представить в виде расчетных зависимостей:

а) при $Gr/Re^2 < 5 \cdot 10^{-4}$

$$\tilde{\xi} = \tilde{\xi}_0 (\bar{\mu}_c / \bar{\mu}_w)^{0,22};$$

б) при $5 \cdot 10^{-4} \leq Gr/Re^2 \leq 3 \cdot 10^{-1}$

$$\tilde{\xi} = \tilde{\xi}_0 (\bar{\mu}_c / \bar{\mu}_w)^{0,22} f(Gr/Re^2),$$

где

$$f(Gr/Re^2) = 2,15 (Gr/Re^2)^{0,4}.$$

Разброс опытных точек для двуокиси углерода относительно полученных зависимостей составляет $\pm 20\%$ для большей части опытов (80% от общего количества обработанных данных). Этот разброс, по-видимому, связан как с условностью в определении величины $\tilde{\xi}$ и в учете влияния переменности физических свойств с использованием среднеинтегральных величин, так и с погрешностью исходных данных.

Московский энергетический институт

Поступило в редакцию
16 V 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. С. Пегухов. Теплофизика высоких температур, 6, № 4, 1968.
2. W. B. Hall, J. D. Jackson, A. Watson. Proc. Inst. Mech. Eng., 182, pt. 31, 1968.
3. R. C. Hendricks, R. J. Simoneau, R. V. Smith. Advances in Cryogenic Eng., 15, 1970.
4. Материалы IV Всес. конф. по теплообмену и гидравлическому сопротивлению при движении двухфазного потока в элементах энергетических машин и аппаратов, ч. 1 и 2. Изд. ЦКТИ, 1971.
5. Н. В. Тарасова, А. И. Леонтьев. Теплофизика высоких температур, 6, № 4, 1968.
6. Л. Ю. Красякова, И. И. Беляков, Н. Д. Фефелова. Теплоэнергетика, № 4, 1973.
7. А. Л. Шварц, М. В. Левинзон, Н. А. Рябова. Электрические станции, № 12, 1966.
8. Д. А. Лабунцов. Теплоэнергетика, № 3, 1972.
9. В. Н. Попов. В сб. Тепло- и массоперенос, 1. «Наука и техника», Минск, 1965.
10. Е. А. Краснощеков, В. С. Протопопов, И. В. Кураева, Ван Фэн. В сб. Тепло и массоперенос, 1. «Наука и техника», Минск, 1965.
11. Е. А. Краснощеков, В. С. Протопопов. Теплофизика высоких температур, 4, № 3, 1966.
12. Б. С. Пегухов, В. С. Протопопов, В. А. Силин. Теплофизика высоких температур, 10, № 2, 1972.
13. В. С. Протопопов, В. А. Силин. Теплофизика высоких температур, 11, № 2, 1973.
14. В. С. Протопопов, И. В. Кураева, А. М. Антонов. Теплофизика высоких температур, 11, № 3, 1973.
15. В. Г. Чакрыгин. Теплоэнергетика, № 1, 1967.
16. М. П. Вукалович, В. В. Алтунин. Теплофизические свойства двуокиси углерода. Атомиздат, 1965.
17. Ш. Г. Каплан, Р. Е. Толчинская. Инж.-физ. ж., 21, № 2, 1971.
18. J. C. Friedly, J. L. Maganago, P. G. Kroeger. Advances in Cryogenic Eng., 14, 1969.
19. Н. М. Шнурр. Теплопередача, № 5, 1969.
20. М. П. Вукалович, С. Л. Ривкин, А. А. Александров. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Изд-во стандартов, 1969.