

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Н. П. Икрянников, Б. С. Петухов, В. С. Протопопов, К расчету теплоотдачи в однофазной околокритической области при вязкостно-инерционно-гравитационном течении, *ТВТ*, 1973, том 11, выпуск 5, 1068–1075

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.238.202.29

11 ноября 2024 г., 17:59:07



УДК 536.25

К РАСЧЕТУ ТЕПЛОТДАЧИ В ОДНОФАЗНОЙ ОКОЛОКРИТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ВЯЗКОСТНО-ИНЕРЦИОННО-ГРАВИТАЦИОННОМ ТЕЧЕНИИ

Н. П. Икрянников, Б. С. Петухов, В. С. Протопопов

Приводятся обобщающие зависимости для расчета теплоотдачи в околоскритической области параметров состояния при совместном действии вынужденной и свободной конвекции. Зависимости получены для подъемного и опускного движения жидкости в вертикальной трубе при $x/d > 20$ в условиях нагревания. Для подъемного течения жидкости предложен метод расчета температуры стенки на участке трубы $x/d < 20$.

В ряде экспериментальных работ по изучению теплообмена при турбулентном течении жидкости сверхкритического давления в обогреваемых вертикальных трубах обнаружено различие в характере теплообмена при подъемном и опускном течении жидкости [1–4]. В случае подъемного течения наблюдалось местное ухудшение теплоотдачи, в случае опускного течения местное ухудшение теплоотдачи не возникало. Эти результаты послужили основой для различных гипотез, согласно которым под влиянием свободной конвекции в случае подъемного движения жидкости происходит снижение турбулентного обмена (ламинаризация течения), приводящее к ухудшению теплоотдачи [4–7]. В ряде работ [5–10] предпринята попытка расчетным путем оценить условия, при которых подъемные силы становятся одного порядка с инерционными. Из такого подхода следует, что начало влияния свободной конвекции можно оценить по значению комплекса типа Gr/Re^n . В работе [9] это условие выражается равенством $Gr/Re^2 \approx 5\xi$, где ξ — коэффициент сопротивления трения. По мнению некоторых авторов, например [6, 8], этот комплекс определяет условия, при которых начинается снижение теплоотдачи. На наш взгляд, такой вывод не очевиден. С помощью этого комплекса можно определить только условия, при которых начинает сказываться влияние свободной конвекции, однако будет ли это приводить к снижению или увеличению теплоотдачи, сказать трудно*. Остается также нерешенным вопрос обобщения опытных данных и создания на этой основе метода расчета теплоотдачи в условиях существенного влияния свободной конвекции.

В [1] опубликованы результаты экспериментального исследования местной теплоотдачи при турбулентном течении двуокиси углерода сверхкритического давления в вертикальной обогреваемой трубе диаметром 29 мм при вязкостно-инерционно-гравитационном течении. Показано, что коэффициенты теплоотдачи на участках трубы вдали от входа ($x/d > 20$) как при подъемном, так и при опускном течении могут в несколько раз

* Более перспективным представляется иной подход, развиваемый в [11]. В основе этого подхода лежит анализ уравнения баланса турбулентной энергии. В этом случае можно определить не только условия начала влияния свободной конвекции, но и результат этого влияния на теплообмен.

превышать значения, рассчитанные для тех же условий по формуле [12]

$$Nu_{\phi} = Nu_0 (\bar{c}_p / c_{pж})^n (\rho_c / \rho_{ж})^{0,3}, \quad (1)$$

не учитывающей влияние свободной конвекции.

Увеличение теплоотдачи под действием свободной конвекции зависит от соотношения между числами $Gr = g(\rho_{ж} - \rho_c)\rho_{ж}d^3/\mu_{ж}^2$ и $Re = \rho wd/\mu_{ж}$ и в первом приближении может быть связано с комплексом Gr/Re [13]. Здесь и в дальнейшем индексы «с» и «ж» означают, что соответствующие физические параметры выбирались при температуре стенки t_c и средне-массовой температуре жидкости $t_{ж}$. Значения физических параметров выбирались по данным [14]. В предлагаемой работе проводится анализ и обобщение наших опытных данных и данных других авторов, полученных в условиях существенного влияния термогравитационных сил.

1. Подъемное течение. Рассматривались опытные данные при течении двуокиси углерода [1–3], азота [15], воды*, полученные при наличии необогреваемого успокоительного участка на входе. Характеристика использованных опытных данных, в которых отмечено существенное влияние свободной конвекции, приведена в таблице.

| Вещество | P/P_K | $T_{ж}/T_K$ | T_c/T_K | d , мм |
|---------------------|-----------|-------------|-----------|----------|
| CO ₂ [1] | 1,06–1,33 | 0,92–1,2 | 0,98–1,8 | 29 |
| N ₂ [15] | 1,01–1,28 | 0,85–1,2 | 1,1–2,7 | 34,8 |
| H ₂ O | ~ 1,1 | 0,85–1,01 | 1,01–1,34 | 16 |

| Вещество | $\frac{\bar{q}_w}{kg/m^2 \cdot сек}$ | $q_c \cdot 10^{-4}$ вт/м ² | Re · 10 ⁵ | Gr · 10 ⁻¹⁰ | (Gr/Re) × × 10 ⁻⁵ |
|---------------------|--------------------------------------|--|----------------------|------------------------|---------------------------------|
| CO ₂ [1] | 106–1100 | 0,5–8,0 | 0,3–5,5 | 0,1–3,6 | 0,1–5,5 |
| N ₂ [15] | ~ 100 | ~ 2,8 | 0,5–2,6 | 2,2–8,5 | 0,8–9,0 |
| H ₂ O | 103–740 | 20–56 | 0,2–2,4 | 0,13–0,23 | 0,07–1,1 |

На рис. 1 приведены характерные кривые распределения температуры стенки в зависимости от энthalпии жидкости для подъемного течения по нашим опытным данным. Обращает внимание немонокотное распределение температуры стенки в начальном обогреваемом участке трубы ($x/d < 20$) с характерными минимумами и максимумами. С увеличением плотности теплового потока характер распределения температуры на начальном участке несколько изменяется; в частности, при соответствующих тепловых потоках исчезает местный максимум в начале обогрева. На остальной части трубы температура стенки изменяется монотонно.

Учитывая различие в характере изменения температуры стенки в начальном участке ($x/d < 20$) и вдали от него, анализ и обобщение опытных данных для этих областей целесообразно провести отдельно.

На рис. 2 приведено обобщение наших опытных данных по CO₂, а на рис. 3 – обобщение данных других авторов по H₂O, CO₂ и N₂ для труб разных диаметров при $x/d > 20$. Опытные данные представлены в виде зависимости Nu/Nu_{ϕ} от параметра $K = Gr(1 - \rho_c/\rho_{ж})/Re^2$, где Nu_{ϕ} – число Нуссельта, вычисленное по (1). Как видно из рисунков, все опытные точки (за исключением особых точек, обозначенных крестиком на рис. 2) обобщаются единой зависимостью с разбросом $\pm 25\%$ для преобладающего числа точек**. Начало влияния свободной конвекции определяется значе-

* М. Е. Ш и ц м а н. Докт. дис. ЭНИН, М., 1970.

** Обработка опытных данных в виде зависимости Nu/Nu_{ϕ} от Gr/Re , приведенная в [1], не позволяет удовлетворительно обобщить опытные данные для разных теплоносителей при течении в трубах разного диаметра.

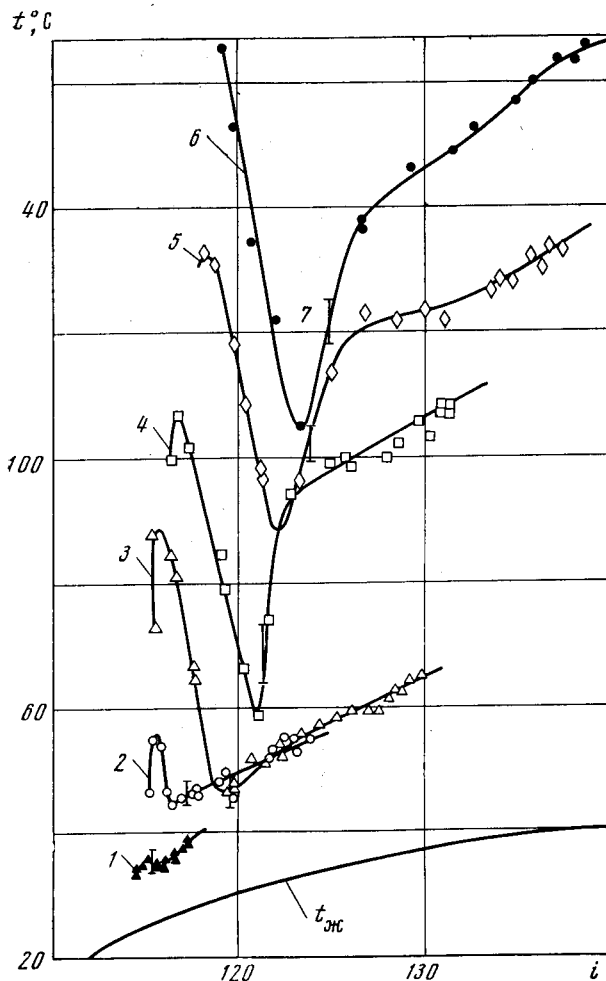


Рис. 1. Зависимость температуры стенки от энтальпии для подъемного течения жидкости. ($R=90 \text{ атм}$, $\rho w=296 \text{ кг/м}^2 \text{сек}$, $q \cdot 10^{-4} \text{ ккал/м}^2 \text{час}$):
 1—1,19; 2—2,66; 3—4,22; 4—5,37; 5—6,83; 6—8,18; 7— $x/d=20$

нием $K \approx 0,4$. При больших значениях этого параметра (от 0,4 до ~ 10) теплоотдача увеличивается. В результате обработки опытных данных получено обобщающее уравнение

$$\text{Nu}/\text{Nu}_\phi = f(K), \quad (2)$$

где $f(K)=1$, при $K \leq 0,4$; $f(K)=1,4[\text{Gr}(1-\rho_c/\rho_{ж})/\text{Re}^2]^{0,37}$ при $0,4 < K < 10$.

Замечено, что небольшая часть наших опытных данных (на рис. 2 они обозначены крестиками) отклоняется от зависимости (2) больше, чем на 25%. Это связано со специфическим характером изменения температуры стенки с ростом плотности теплового потока. Если для большинства изученных режимов температура стенки всегда увеличивается с ростом q_c , то для режимов, соответствующих $T_{ж}/T_m \leq 1$, $1,03 < T_c/T_m < 1,08$ (крестики на рис. 2) температура стенки трубы на участке $x/d > 20$ при увеличении q_c практически остается неизменной (рис. 1, кривые 2, 3). Последнее означает, что в указанных условиях коэффициенты теплоотдачи увеличиваются почти пропорционально плотности теплового потока, в результате чего температура стенки в сечениях трубы с одинаковыми значениями $t_{ж}$ оста-

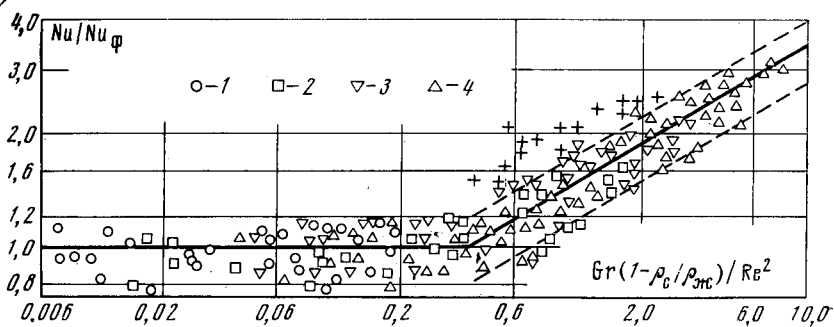


Рис. 2 Зависимость Nu/Nu_{ϕ} от $Gr(1-\rho_c/\rho_{ж})/Re^2$ для подъемного течения
 $Re \cdot 10^{-5}$: 1 — $2,5 \div 5,0$; 2 — $1,5 \div 2,5$; 3 — $0,8 \div 1,2$; 4 — $0,4 \div 0,8$

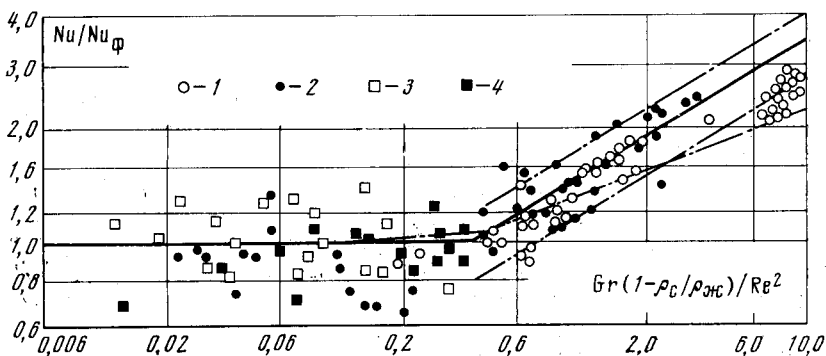


Рис. 3. Nu/Nu_{ϕ} в зависимости от $Gr(1-\rho_c/\rho_{ж})/Re^2$:
 1—данные [15]; 2— H_2O ; 3—[3]; 4—[4]; пунктир—расчет по [16]

ется примерно постоянной. Как можно видеть из рис. 2, зависимость Nu/Nu_{ϕ} от $Gr(1-\rho_c/\rho_{ж})/Re^2$ для рассматриваемых особых точек сохраняется такой же, как и для остальных точек, однако в количественном отношении они характеризуются более интенсивной теплоотдачей. Поскольку для упомянутых режимов теплоотдача увеличивается при неизменных значениях температуры стенки и жидкости, их нельзя описать с помощью комплексов, составленных только из физических параметров, взятых при температурах стенки и жидкости. Можно предположить, что с ростом q_c теплоотдача увеличивается за счет увеличения градиента температуры на стенке при неизменном значении разности температур $t_c - t_{ж}$.

Насколько нам известно, подобные специфические режимы в указанном диапазоне определяющих параметров в других работах не наблюдались. Небольшое количество полученных нами опытных данных на этих режимах пока не позволяет провести их детальный анализ и обобщение. Расчет показывает, что действительные температуры стенки для этих режимов по сравнению с рассчитанными по уравнению (2) будут на $10 \div 20^\circ$ ниже (в охваченном опытами диапазоне параметров).

Для выяснения закономерностей теплообмена в термическом начальном участке трубы ($x/d \leq 20$) использовались наши опытные данные по теплоотдаче к двуокиси углерода, данные [4] по теплоотдаче к воде, а также данные [3] по теплоотдаче к двуокиси углерода*. Для анализа влияния свободной конвекции на характер изменения температуры стенки

* Из работ [3, 4] использовались данные с местным максимумом температуры стенки при $(x/d)_{\max} \leq 10$, как и в работе [1].

в начальном участке целесообразно ввести параметр

$$(Gr_A/Re)_{вх} = [(4g\beta d^2/\lambda Pr) (q_c/\bar{w}^2)]_{вх}, \quad (3)$$

в котором физические свойства отнесены к температуре жидкости на входе. Такой способ выбора физических свойств подтверждают проведенные нами, а также в [17] измерения полей температуры в начальном участке. Эти измерения показали, что при $x/d < 10$ температура во всей

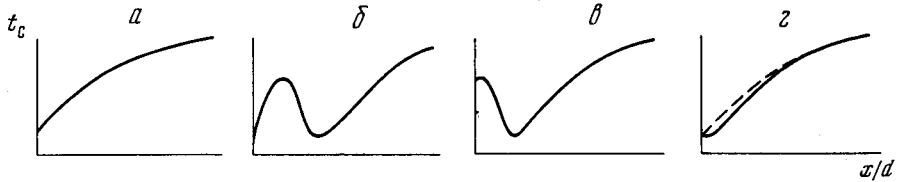


Рис. 4. Типичные кривые изменения $T_c(x/d)$ и границы их существования: а— $0,3 < (Gr_A/Re)_{вх} < 170$; б— $150 < (Gr_A/Re)_{вх} < 600$; в— $1000 < (Gr_A/Re)_{вх} < 3500$; г— $3500 < (Gr_A/Re)_{вх} < 8500$

области течения, за исключением пристенного слоя, практически постоянна и равна температуре на входе.

На рис. 4 показаны типичные графики изменения температуры стенки по длине трубы и границы значений $(Gr_A/Re)_{вх}$, в пределах которых они реализуются. При $0,3 < (Gr_A/Re)_{вх} < 150 \div 170$ температура стенки в начальном участке, как и по всей длине трубы, монотонно возрастает (см. рис. 4, а). При значениях $150 \div 170 < (Gr_A/Re)_{вх}$ в начальном участке возникает максимум в распределении температуры стенки. Максимум продолжает существовать до значений $(Gr_A/Re)_{вх} \approx 600$ (см. рис. 4, б). При дальнейшем увеличении этого параметра максимум постепенно вырождается и кривая распределения температуры принимает вид, показанный на рис. 4, в. Такое распределение температуры стенки наблюдается в диапазоне значений $1000 < (Gr_A/Re)_{вх} < 3600$. Наконец, при еще более высоких значениях $(Gr_A/Re)_{вх}$ распределение типа 4, в переходит в монотонное изменение температуры стенки по длине, показанное на рис. 4, г. Замечим, что аналогичный характер изменения температуры стенки наблюдался в работе [2].

Приведенные результаты дают основание предполагать, что возникновение в начальном участке трубы резко выраженной немонотонности в распределении температуры стенки связано с влиянием свободной конвекции. Для режимов, соответствующих рис. 4, а, влияние свободной конвекции на теплоотдачу, по-видимому, незначительно. Это подтверждается тем, что для точек, принадлежащих рассматриваемым режимам, с внесением соответствующей поправки C_i на начальный участок отношение $Nu/Nu_\phi C_i \approx 1$. Для остальных режимов характерно нарастающее влияние свободной конвекции на теплоотдачу при вынужденном течении. Так, для режимов, соответствующих рис. 4, г, отношение $Nu/Nu_\phi \approx 2$.

Что касается причин возникновения максимумов в распределении температуры стенки в начальном участке, то этот вопрос нуждается в более детальном изучении.

На рис. 5 представлена зависимость местоположения максимума температуры стенки от $(Gr_A/Re)_{вх}$ для режимов типа 4, б. Несмотря на значительный разброс опытных точек, что связано с неточностью определения координаты максимума температуры стенки $(x/d)_{\max} = \tilde{x}_{\max}$, наблюдается отчетливая зависимость, которую можно описать эмпирическим уравнением

$$\tilde{x}_{\max} = \frac{95}{(Gr_A/Re)_{вх}^{0,25}} - 15,3. \quad (4)$$

Уравнением (4) можно пользоваться при значениях $200 \leq (Gr_A/Re)_{вх} \leq 8500$. При $200 \leq (Gr_A/Re)_{вх} \leq 1500$ \tilde{x}_{\max} изменяется от 10 до 0, при $(Gr_A/$

$(Re)_{вх} > 1500 \tilde{x}_{\max}$ принимает отрицательные значения, что не имеет физического смысла, но удобно для расчета теплоотдачи, как это будет видно из дальнейшего.

Местные числа Нуссельта в начальном участке трубы оказались меньшими или приблизительно равными значениям чисел Нуссельта, рассчитанным по уравнению (2). Анализ показал, что относительное снижение теплоотдачи в данном сечении начального участка определяется положе-

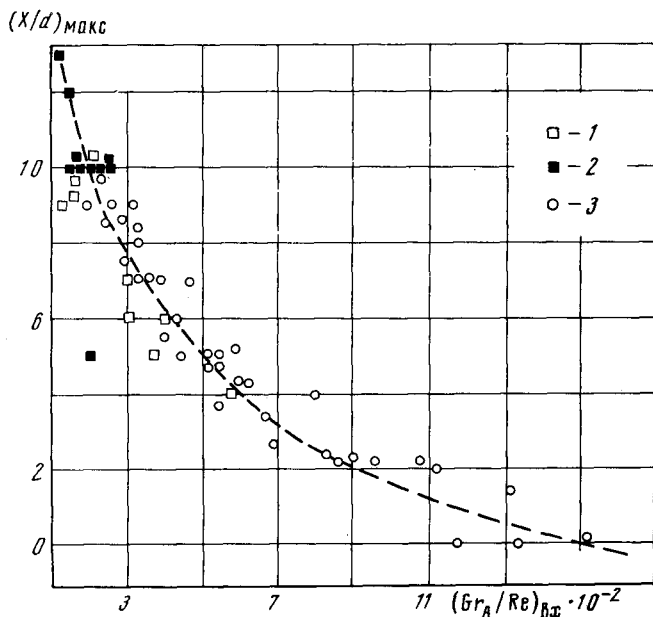


Рис. 5. Местоположение местного максимума T_c в начальном участке в зависимости от $(Gr_A/Re)_{вх}$:

1—[3]; 2—[4]; 3—[1]

нием рассматриваемого сечения относительно координаты \tilde{x}_{\max} . Для расчета теплоотдачи в начальном участке трубы, т. е. при $x/d < 20$, подобрано приближенное уравнение

$$Nu/Nu_* = f(\tilde{x}), \quad (5)$$

где Nu_* — число Нуссельта, рассчитанное по формуле (2); $\tilde{x} = x/d$

$$f(\tilde{x}) = 0,56 + 0,043 (\tilde{x} - \tilde{x}_{\max}) \quad \text{при } 0 < \tilde{x} - \tilde{x}_{\max} \leq 10, \quad (6)$$

$$f(\tilde{x}) = 0,56 + 0,043 (\tilde{x}_{\max} - \tilde{x}) \quad \text{при } \tilde{x} < \tilde{x}_{\max}, \quad (7)$$

при $\tilde{x} - \tilde{x}_{\max} > 10$ значение $f(\tilde{x}) = 1$.

В случае, если \tilde{x}_{\max} оказывается отрицательным, $f(\tilde{x})$ вычисляется по формуле (6). Уравнения (5)–(7) описывают опытные данные [1] по теплоотдаче в начальном термическом участке с разбросом в пределах $\pm 25\%$ для большинства точек и с такой же точностью согласуются с многочисленными опытными данными по теплоотдаче в точке максимума температуры стенки при $x/d < 10$, полученными в [3, 4].

Из (6) и (7), в частности, следует, что минимальные значения коэффициентов теплоотдачи, соответствующие максимуму температуры стенки в начальном участке трубы, могут рассчитываться по формуле

$$Nu_{\min} = 0,56 \cdot Nu_* \quad (8)$$

2. Опускное течение. При опускном течении в обогреваемых трубах количество опытных данных с заметным влиянием свободной конвекции на теплообмен значительно меньше, чем при подъемом, Наиболее полно

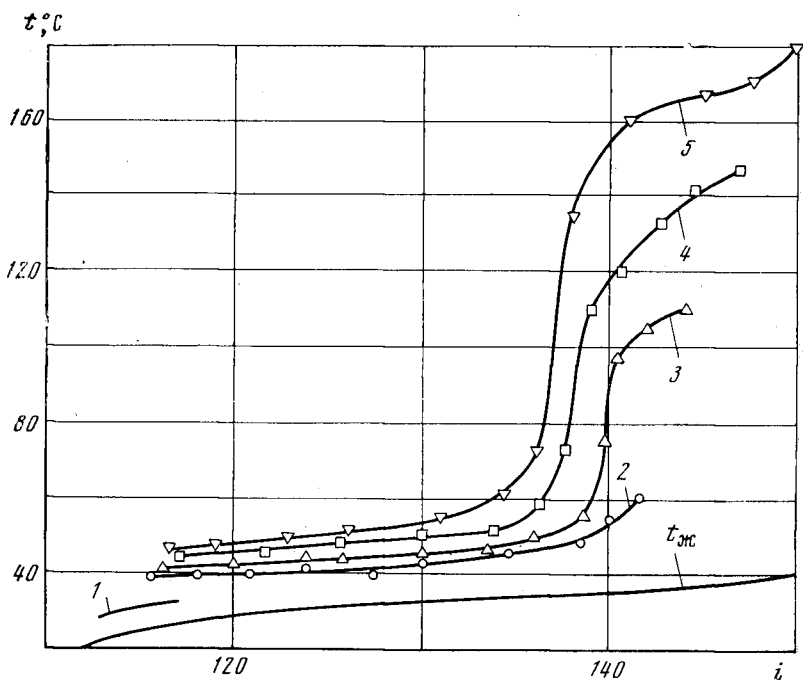


Рис. 6. Зависимость температуры стенки от энтальпии для опускного течения жидкости ($P=80$ атa; $\rho_w=148$ кг/м²сек; $q \cdot 10^{-4}$ ккал/м²час):

1—0,67; 2—3,98; 3—4,76; 4—5,49; 5—6,78

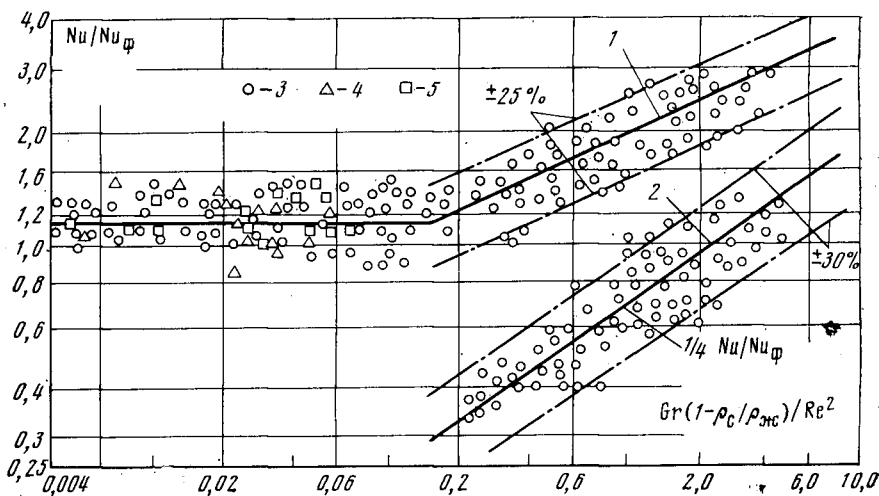


Рис. 7. Nu/Nu_{ϕ} в зависимости от $Gr(1-\rho_c/\rho_{ж})/Re^2$ для опускного течения:

1—уравнение (9); 2—(10); 3—данные [1]; 4—[2]; 5—[3]

теплообмен при опускном тении исследован в работе [1] с двуокисью углерода. Поэтому в дальнейшем используются данные, полученные в [1]. Характеристика этих данных та же, что и в таблице.

На рис. 6 представлены типичные кривые распределения температуры стенки в зависимости от энтальпии жидкости для опускного течения. Для этого случая характерно монотонное изменение температуры стенки по длине обогреваемого участка (в некоторых режимах наблюдались небольшие максимумы температуры стенки при $x/d < 20$, аналогичные приведен-

ному на рис. 4, в). Обращает внимание значительная разница теплоотдачи на участках трубы с $t_{ж} \leq t_m$ и $t_{ж} \geq t_m$, что не наблюдалось при подъемном течении жидкости.

Обработка опытных данных в координатах $Nu/Nu_{\phi} - K$ показала, что в интервале значений $0,004 \leq K \leq 0,15$ опытные числа Нуссельта не зависят от комплекса K , но оказываются выше рассчитанных по формуле (1) на $\sim 15\%$ (рис. 7). Здесь же нанесены опытные данные [2, 3]. Они находятся в удовлетворительном согласии с результатами наших измерений.

При значениях $K > 0,15$ наблюдается интенсивный рост теплоотдачи с увеличением K . Зависимость Nu/Nu_{ϕ} от K оказалась различной для следующих двух групп опытных данных:

1. Опытные данные, для которых $T_{ж} < T_c < T_m$, или $T_{ж} < T_c < 1,02 T_m$, описываются зависимостью

$$Nu/Nu_{\phi} = 1,96 K^{0,28}. \quad (9)$$

2. Опытные данные, для которых $T_{ж} < T_m$, а $T_c \geq 1,02 T_m$, описываются зависимостью

$$Nu/Nu_{\phi} = 2,75 K^{0,46}. \quad (10)$$

Как видно из рис. 7, эти уравнения описывают опытные данные с разбросом $\pm 25-30\%$. Сравнительно высокий разброс опытных данных, особенно для второй группы, связан, по-видимому, с некоторой неустойчивостью течения при совместном действии вынужденной и свободной конвекции. Это, в частности, нашло отражение в том, что для некоторых режимов температуры стенки, измерявшиеся в опытах, случайным образом изменялись в пределах $\sim 10^\circ C$, что составляло до 25% от температурного напора. Заметим, что аналогичные явления наблюдались в работе [3].

Следует отметить, что при опускном течении жидкости в обогреваемых трубах теплоотдача выше, чем при подъемном. Однако с увеличением параметра K разница в теплоотдаче между этими случаями уменьшается.

Учитывая ограниченное количество опытных данных, которыми мы располагали (в особенности для опускного течения), а также отсутствие достаточно полного представления о механизме взаимодействия вынужденной и свободной конвекции в рассматриваемых условиях, предложенные в этой работе обобщенные зависимости, несомненно, будут нуждаться в дальнейшем уточнении по мере накопления опытных данных и углубления наших представлений об изучаемых процессах.

Институт высоких температур
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
4 V 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Икрянников, Б. С. Петухов, В. С. Протопопов. Теплофизика высоких температур, 10, № 4, 1972.
2. P. J. Bourke, D. J. Pulling, L. E. Gill, W. H. Denton. Intern. J. of Heat and Mass Trans., 13, 1339, 1970.
3. J. D. Jackson, K. Evans-Lutterodt. Res. Rep. NE-2, University of Manchester, 1968; Res. Rep. NE-3, University of Manchester, 1971.
4. Н. С. Алферов, Б. Ф. Балунев, Р. А. Рыбин. Тепло- и массоперенос, 2, ИТМО, Минск, 1972.
5. W. V. Hall. Res. Rep. NE-1, University of Manchester, 1968.
6. W. V. Hall, J. D. Jackson. Paper ASME, 69-HT-55, 1969.
7. A. I. Leontiev. Paper ASME 69-HT-60, 1969.
8. Б. Я. Каменецкий. Теплофизика высоких температур, 11, № 2, 1973.
9. Д. А. Лабунцов. Теплоэнергетика, № 3, 1972.
10. П. Гриффит, Б. Ширалкар. Теплопередача, № 3, 1970.
11. А. Ф. Поляков. Теплофизика высоких температур, 11, № 1, 1973.
12. Е. А. Краснощеков, В. С. Протопопов. Теплофизика высоких температур, 4, № 3, 1966.
13. Б. С. Петухов, Б. К. Стригин. Теплофизика высоких температур, 6, № 5, 1968.
14. М. П. Вукалович, В. В. Алтуни. Теплофизические свойства двуокиси углерода. Атомиздат, 1965.
15. R. L. Von Berg, K. D. Williamson, F. I. Edeskuty. Advances in Cryogenic Engineering, 15, 238, 1970.
16. И-Юн-Шу, Д. Смит. Теплопередача, № 2, 1961.
17. P. J. Bourke, D. J. Pulling. Paper ASME, 71-HT-24, 1971.