

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

B. S. Petukhov, A. F. Polyakov, V. V. Troitskii,
Yu. L. Shekhter, Friction and heat-transfer during
turbulent-flow in horizontal pipes in the field of
gravity,
TVT, 1982, Volume 20, Issue 3, 490–495

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt6368>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that
you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.174

April 27, 2025, 12:22:57



УДК 532.517.4:533.6

ТРЕНИЕ И ТЕПЛООТДАЧА ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБАХ В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

*Петухов Б.С., Поляков А.Ф., Троицкий В.В.,
Шехтер Ю.Л.*

Представлены результаты экспериментального исследования распределения по периметру горизонтальной трубы местных касательных напряжений на теплообменной поверхности при турбулентном течении воздуха. Изменение распределения трения в зависимости от степени влияния подъемных сил проанализировано совместно с полученными ранее данными по структуре течения и теплоотдаче.

Измерения распределений скорости и температуры при турбулентном течении воздуха в горизонтальных трубах [1–5] свидетельствуют о том, что действие массовых термогравитационных сил, обусловленных неоднородностью распределения плотности в поле силы тяжести вследствие неоднородности температурного профиля, оказывают существенное влияние на структуру течения и теплообмен.

Целью данной работы является исследование распределения трения и теплоотдачи по периметру горизонтальной обогреваемой трубы в условиях существенного влияния термогравитационных сил.

Воздействие термогравитационных сил проявляется тем сильнее, чем больше число $Gr = g\beta q_c d^4 / \lambda \nu^2$ и меньше число $Re = \bar{U}d / \nu$. Как показано в [3], в качестве параметра, характеризующего их влияние, можно использовать отношение $Gr/Gr_{пр}$, в котором $Gr_{пр}$ определяется по соотношению, полученному в [6]

$$Gr_{пр} = 3 \cdot 10^{-5} Re^{2,75} Pr^{0,5} [1 + 2,4 Re^{-0,125} (Pr^{2/3} - 1)], \quad (1)$$

которое описывает границу начала влияния подъемных сил на местную теплоотдачу.

Экспериментальное исследование выполнено при турбулентном стабилизированном течении воздуха в круглой трубе диаметром 144 мм и длиной 70 калибров, из которых 52d составили секцию, обогреваемую непосредственным пропусканием по стенке трубы электрического тока. Конец трубы длиной 3 калибра, на котором монтировался датчик касательного напряжения, можно было поворачивать вокруг оси канала. Этот участок трубы оснащен нагревателем из нихромовой ленты с автономным регулируемым питанием, с помощью которого обеспечивались тепловые условия, соответствующие основной обогреваемой секции.

Для измерения напряжения трения на поверхности трубы использовался метод нагретой пленки, реализованный с помощью сконструированного и изготовленного датчика специальной конструкции, имеющего высокую чувствительность при измерении малых значений касательного напряжения на стенке при течении воздуха.

Методика измерений позволила осуществить независимость показаний датчика от температуры потока и стенки в диапазоне до 500 К.

Датчик монтировался на поворотном конце трубы на расстоянии 1,5d от выхода. С его помощью измерялось распределение $\tau_c(\varphi)$ по всему периметру путем поворота трубы с шагом 15°. После каждого поворота осуществлялась выдержка в течение ~1 ч для стабилизации тепловых граничных условий, определяемой по постоянству сопротивления рабочей пленки датчика в режиме измерения температуры.

После монтажа датчика в канале осуществлялась его тарировка в изотермических условиях, в результате которой определялась связь между

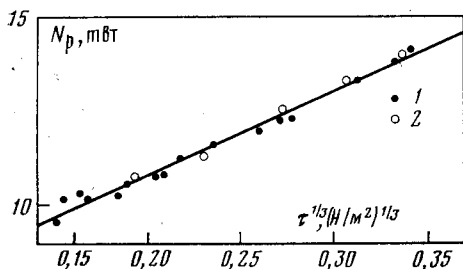


Рис. 1

Рис. 1. Тарировочная зависимость датчика касательных напряжений: 1 — $t_c = t_{ж} = 10,7^\circ \text{C}$, $\Delta t_p = 80^\circ \text{C}$; 2 — $t_c = 95^\circ \text{C}$, $t_{ж} = 45^\circ \text{C}$

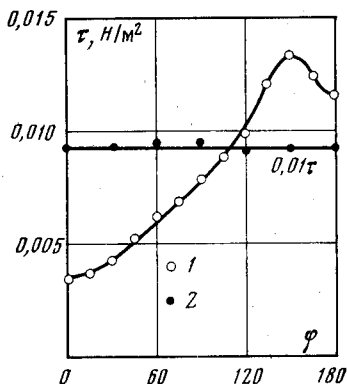


Рис. 2

Рис. 2. Распределение касательного напряжения по периметру трубы: 1 — $Re = 1,25 \cdot 10^4$, $Gr/Gr_{кр} = 127$; 2 — $2,2 \cdot 10^5$; 0,4

мощностью, выделяемой в пленке, и касательными напряжениями на стенке [7]

$$I^2 R_p = N_0 + A \tau_c^{1/2}, \quad (2)$$

где константы N_0 и A определялись по методу наименьших квадратов. При этом τ_c определялось из соотношения $\tau_c = \xi \rho \bar{U}^2 / 8$, которое при использовании зависимости Блазиуса дает

$$\tau_c = 0,0395 \rho \bar{U}^2 Re^{-0,25}.$$

В опытах использовалась термоанемометрическая аппаратура 55М фирмы «DISA» со стандартным мостом 55М10, для которого $I = E / (50 + R_p)$. Таким образом

$$N_p = \frac{E^2 R_p}{(50 + R_p)^2} = N_0 + A \tau_c^{1/2}. \quad (3)$$

Здесь E — напряжение на выходе моста, измеренное интегрирующим цифровым вольтметром 55Д30; $R_p = R_{cm}$ — рабочее сопротивление пленки с учетом перегрева; $m = 1 + \alpha_p (T_p - T_c)$ — перегрев рабочей пленки относительно температуры стенки.

Как при тарировке, так и в опытах поддерживался постоянный перегрев пленки относительно стенки $\Delta T_p = T_p - T_c = 80^\circ \text{C}$.

На рис. 1 представлен типичный пример тарировочной характеристики датчика касательных напряжений на стенке. Видно, что экспериментальные точки хорошо описываются уравнением (2). Кроме того, из рисунка следует, что показания датчика описываются одной зависимостью как в изотермических условиях ($T_c = T_{ж}$), так и при наличии теплообмена, т. е. тарировочная характеристика не зависит от температуры на стенке и в потоке.

Среднее касательное напряжение на стенке и относительное среднеквадратичное значение его пульсаций σ_τ определяются из соотношений, следующих из (2), (3),

$$\tau_c = ((N_p - N_0) / A)^2, \quad (4)$$

$$\sigma_\tau / \tau_c = \left(\frac{\partial \tau_c}{\partial E} \sqrt{e^2} \right) / \tau_c = \frac{6 E R_p}{(N_p - N_0) (50 + R_p)^2} \sqrt{e^2}, \quad (5)$$

где $\sqrt{e^2}$ — среднеквадратичное напряжение на выходе моста, измеряемое вольтметром 55Д35.

По измеренному сопротивлению пленки R_c в каждой точке периметра с использованием известной градуировочной зависимости $R_c(t)$ определялось распределение $t_c(\varphi)$. Как показано в [3, 8], зависимость $t_c(\varphi)$ может быть описана в виде

$$T_c = T_{c\pi} + (T_{c0} - T_{c\pi}) \cos^k(\varphi/2). \quad (6)$$

Здесь $T_c = \frac{1}{Nu} = \frac{t_c - t_{ж}}{\bar{q}_c d} \lambda_{ж}$ — безразмерная температура стенки; \bar{q}_c —

средний по периметру тепловой поток; T_{c0} и $T_{c\pi}$ — температура на верхней и нижней образующей трубы соответственно; φ — угол, отсчитываемый от верхней образующей трубы.

Неоднородность распределения температуры по периметру вызывает тангенциальные перетечки тепла по стенке трубы и перераспределение местного по периметру теплового потока. Из уравнения теплопроводности для тонкого кольца с внутренними источниками тепла получено соотношение для расчета локального по периметру теплового потока [3]

$$q_c(\varphi) = \bar{q}_c \left(1 + 2 \frac{\lambda_c}{\lambda_{ж}} \frac{\delta}{\bar{r}} \frac{\partial^2 T_c(\varphi)}{\partial \varphi^2} \right), \quad (7)$$

где δ и \bar{r} — толщина и средний радиус стенки трубы; λ_c и $\lambda_{ж}$ — коэффициенты теплопроводности стенки и жидкости соответственно.

Таким образом, по измеренному распределению $t_c(\varphi)$ можно рассчитать изменение по периметру трубы числа $Nu(\varphi)$

$$Nu(\varphi) = q_c(\varphi) d / (t_c(\varphi) - t_{ж}) \lambda_{ж}. \quad (8)$$

Распределения касательного напряжения и теплоотдачи по периметру трубы измерены в диапазоне $8,6 \leq Re \cdot 10^3 \leq 64$ и $Gr/Gr_{пр} \leq 130$ при $T_c/T_{ж} \leq 1,25$, что обеспечивало отсутствие влияния температурного фактора. При измерениях, помимо информации с датчика касательного напряжения на стенке, регистрировались такие характеристики течения, как среднemasовые температуры газа на входе и выходе, мощность, затрачиваемая на подогрев газа, и его расход [1]. Все опыты выполнены при установившихся стабилизированных режимах.

Измерения τ_c , выполненные при неизотермическом турбулентном течении при отсутствии влияния массовых сил ($Re = 2,17 \cdot 10^5$, $Gr/Gr_{пр} = 0,4$), показали постоянство касательных напряжений по периметру трубы (рис. 2). На этом же рисунке показано распределение касательного напряжения для одного из исследованных режимов. Видно, что значение касательного напряжения в этих условиях весьма сильно изменяется по периметру трубы от $0,004$ н/м² при $\varphi = 0$ до $0,012$ н/м² при $\varphi = \pi$. Следует отметить, что достаточно надежное измерение столь малых значений τ_c традиционными методами затруднено.

В [6] получены соотношения для расчета полей осевой компоненты скорости и температуры при малом влиянии подъемных сил. После интегрирования профилей и соответствующих преобразований можно получить выражения для расчета распределения чисел Nu и τ_c по периметру трубы в этих условиях

$$Nu/Nu_\tau = 1 - 340 \frac{Gr}{Re^{2,75} Pr^{0,5} [1 + 2,4 Re^{-0,125} (Pr^{2/3} - 1)]} \cos \varphi, \quad (9)$$

$$\tau_c/\tau_\tau = \left(1 - 140 \frac{Gr}{Re^{2,75} Pr^{0,5}} \cos \varphi \right)^2. \quad (10)$$

На рис. 3 представлено сопоставление результатов расчета по полученным соотношениям с экспериментальными данными при малых $Gr/Gr_{пр}$, свидетельствующее о качественном их соответствии. Сравнение

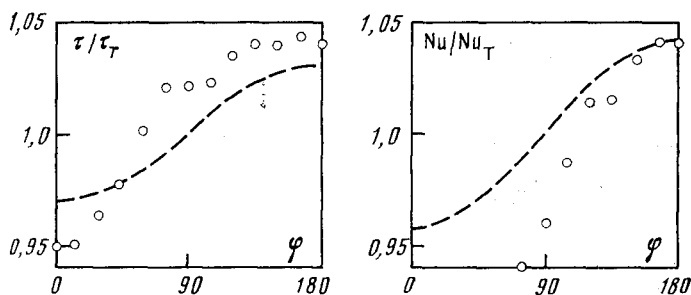


Рис. 3. Сопоставление результатов расчетов по формулам (9) и (10) (кривые) с экспериментальными данными ($Re=6,3 \cdot 10^4$; $Gr/Gr_{пр}=4$)

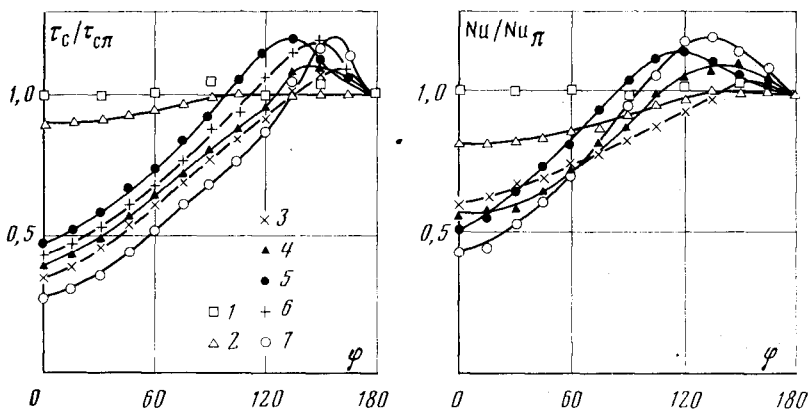


Рис. 4. Относительное изменение напряжения трения и теплоотдачи по периметру трубы: 1 - $Re \cdot 10^{-4}=21,7$; $Gr/Gr_{пр}=0,4$; 2 - 6,24; 4; 3 - 5,22; 8; 4 - 3,55; 19; 5 - 2,63; 30; 6 - 1,81; 62; 7 - 1,25; 127

результатов показывает, что зависимости (9), (10) правильно определяют границы начала влияния термогравитационных сил на местные трение и теплоотдачу. Вблизи нижней образующей имеется хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными; вблизи верхней образующей экспериментальные значения значительно меньше расчетных, что, очевидно, связано в первую очередь с неучитываемым в расчете влиянием сил плавучести на турбулентность, приводящим в условиях устойчивой стратификации к интенсивному уменьшению турбулентного переноса.

На рис. 4 представлено распределение относительных значений касательных напряжений и коэффициентов теплоотдачи по периметру трубы. Распределение τ_c и Nu существенно неоднородно, причем неоднородность увеличивается по мере увеличения параметра влияния термогравитационных сил. Если при очень слабом их влиянии ($Gr/Gr_{пр} \approx 0,4$) $\tau_c(\varphi) \approx \text{const}$ и $Nu(\varphi) \approx \text{const}$ по всей окружности, то при $Gr/Gr_{пр} \approx 10$ имеет место значительное уменьшение напряжения трения и теплоотдачи вблизи верхней образующей трубы и некоторый рост вблизи нижней.

Такой характер изменения рассматриваемых величин соответствует структуре течения в этих условиях [4, 5]. При отсутствии влияния термогравитационных сил течение осесимметрично. При малых $Gr/Gr_{пр}$ воздействие массовых сил проявляется в наложении на осевое течение вторичных токов в плоскости поперечного сечения трубы в виде пары вихрей, симметричных относительно вертикальной диаметральной плоскости. При увеличении $Gr/Gr_{пр}$ центры вихрей смещаются вниз относительно горизонтальной диаметральной плоскости. Кроме того, происходит деформация поля осевой компоненты скорости, что ведет к снижению градиента скорости в пристенной области в верхней части трубы и увеличению в нижней. Вследствие этого заметно снижается генерация пуль-

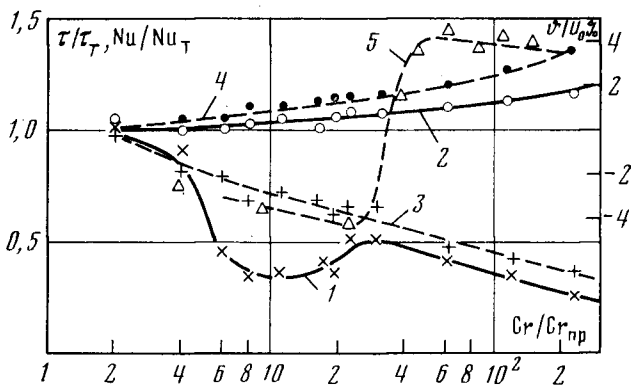


Рис. 5. Касательные напряжения (1, 2) и коэффициенты теплоотдачи (3, 4) на верхней и нижней образующих трубы и радиальная компонента скорости (5) при $\varphi=0, R=0,5$; 1, 3 - $\varphi=0$; 2, 4 - π

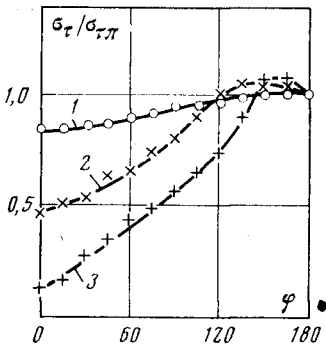


Рис. 6

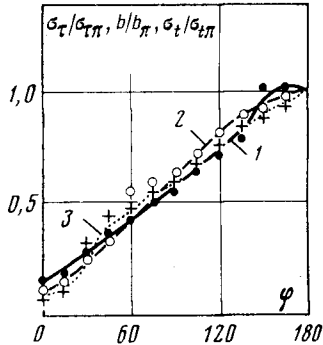


Рис. 7

Рис. 6. Изменение интенсивности пульсаций касательного напряжения по периметру трубы: 1 - $Re \cdot 10^{-4} = 6,24$; $Gr/Gr_{pp} = 4$; 2 - 2,63; 30; 3 - 1,25; 127

Рис. 7. Распределения касательного напряжения на стенке (1), интенсивности пульсаций температуры при $y/R=0,035$ (2) и энергии турбулентности при $y/R=0,105$ (3) по периметру трубы: 1 - данная работа; 2, 3 - результаты [5]

сационного движения в верхней части трубы, которая к тому же подавляется в условиях устойчивого распределения плотности. В нижней части трубы оба эти фактора содействуют увеличению турбулентности. Указанные обстоятельства приводят к уменьшению τ_c и Nu вблизи верхней образующей и росту вблизи нижней (рис. 5).

При дальнейшем росте Gr/Gr_{pp} до 30-40 происходит увеличение интенсивности вихревого движения, и зона увеличения τ_c и Nu охватывает область $90^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$, а абсолютные значения этих величин повышаются. В то же время имеет место некоторое увеличение τ_c в верхней части трубы, что можно объяснить началом формирования при данном сочетании режимных параметров второй пары вихрей, направление вращения которой противоположно вращению первой пары. В самом деле, как отмечалось в [4, 5], переход от устойчивой двухвихревой структуры вторичных токов к четырехвихревой происходит при $Gr/Gr_{pp} \approx 30-40$.

На рис. 5 показано изменение радиальной компоненты скорости v в точке с координатами $\varphi=0, R=r/r_0=0,5$. При $Gr/Gr_{pp} < 30$ радиальная скорость направлена вниз, а при $Gr/Gr_{pp} > 40$ - вверх, что свидетельствует об образовании второй пары вихрей. Их развитие обуславливает некоторое увеличение трения вблизи верхней образующей. Дальнейшее развитие четырехвихревой структуры приводит к снижению трения и теплоотдачи в этой части периметра.

На этом же рисунке представлено сопоставление экспериментальных данных по τ_c и Nu для верхней и нижней образующих трубы с резуль-

татами расчетов для турбулентного течения в отсутствие влияния массовых сил. В нижней части трубы трение и теплоотдача увеличиваются на 15–30%, в то время как в верхней части существенно уменьшаются (в ~2,5 раза). Эти результаты находятся в хорошем соответствии с полученными ранее данными [3, 8] и должны учитываться в расчетах соответствующих теплообменных систем.

Сильное воздействие массовых сил приводит к почти полному подавлению турбулентности в верхней части трубы. Об этом свидетельствуют данные о распределении по периметру трубы интенсивности пульсаций касательного напряжения σ_τ (рис. 6). Действительно, распределение $\sigma_\tau(\varphi)$ весьма неоднородно по периметру, причем неоднородность тем больше, чем выше $Gr/Gr_{пр}$, и при $Gr/Gr_{пр}=127$ величина $\sigma_\tau(0)$ составляет 13% от $\sigma_\tau(\pi)$. Затухание турбулентности вблизи верхней образующей подтверждается данными измерений энергии турбулентности b и интенсивности пульсаций температуры σ_t в потоке вблизи стенки [5]. Характер изменения σ_τ , b и σ_t одинаков (рис. 7) и свидетельствует о существенном уменьшении интенсивности пульсационного движения в верхней части трубы.

Институт высоких температур
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
27.11.1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулешов В. А., Поляков А. Ф., Шехтер Ю. Л. Распределение скорости и температуры в турбулентном потоке воздуха в горизонтальной трубе при влиянии термогравитационных сил.— ИФЖ, 1974, т. 27, № 5.
2. Петухов Б. С., Поляков А. Ф., Кулешов В. А., Шехтер Ю. Л. Турбулентное течение и теплообмен в горизонтальных трубах при существенном влиянии термогравитационных сил.— В кн.: Теплообмен-1974. Советские исследования. М.: Наука, 1974.
3. Petukhov B. S., Polykov A. F., Kuleshov V. A., Shekhter Yu. L. Experimental Study of the Effect of Thermogravitation upon Turbulent Flow and Heat Transfer in Horizontal Pipes.— Proc. Int. Simp. Turbulent Buoyant Convection, 719–727. Dubrovnik, 1976.
4. Петухов Б. С., Поляков А. Ф., Троицкий В. В., Шехтер Ю. Л. Воздействие гравитационного поля на структуру турбулентного неизотермического течения в горизонтальных цилиндрических каналах.— ДАН СССР, 1977, т. 236, № 4, с. 820.
5. Петухов Б. С., Поляков А. Ф., Троицкий В. В., Шехтер Ю. Л. Структура вторичных течений в турбулентном потоке в горизонтальной трубе при существенном влиянии термогравитационных сил.— В кн.: Теплообмен-1978. Советские исследования. М.: Наука, 1980.
6. Поляков А. Ф. Развитие вторичных свободно конвективных токов при вынужденном турбулентном течении в горизонтальных трубах.— ПМТФ, 1974, № 5, с. 60.
7. Brown G. L. Theory and Application of Heated Films for Skin Friction Measurement.— Proc. 1967 Heat Transfer and Fluid Mech. Instr. Stanford Univ. Press, 1967.
8. Петухов Б. С., Поляков А. Ф., Шехтер Ю. Л. Турбулентное течение и теплообмен в поле силы тяжести.— ТВТ, 1978, т. 16, № 3, с. 624.