

В.К. Шукин, А.А. Халатов, В.И. Голдобеев

РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА
В НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ТРУБЫ

Принятые обозначения

- φ, φ_n - угол закрутки потока соответственно на радиусах z и R
- n - показатель интенсивности закрутки
- R - радиус канала
- R^* - радиус кривизны винтовой линии
- W_x, W_φ, W_z - осевая, тангенциальная и суммарная скорости течения
- $\delta_z^{**}, \delta_x^{**}$ - толщины потери импульса, построенные для суммарной и осевой скоростей течения
- $Nu_x = \frac{\alpha x}{\lambda_f}$ - число Нуссельта
- $St = \frac{\alpha}{W_{xcp} c_p \rho_f}$ - число Стантона
- $Re_x = \frac{W_{xcp} x}{\nu_f}; Re_{x_0} = \frac{W_{x_0} x}{\nu_f}$ - числа Рейнольдса, построенные по расстоянию от входа x
- $Re_d = \frac{W_{xcp} 2R}{\nu_f}; Re_{d_0} = \frac{W_{x_0} 2R}{\nu_f}$ - числа Рейнольдса, построенные по диаметру канала
- $Re_r^{**} = \frac{W_{x_0} \delta_r^{**}}{\nu_f}; Re_z^{**} = \frac{W_z \delta_z^{**}}{\nu_f}$ - числа Рейнольдса, построенные по интегральным толщинам
- ρ - плотность
- c_p - теплоемкость
- ν - кинематическая вязкость

Индексы

- f - поток
- $кр$ - критический
- min - минимальный
- o - условия на внешней границе пограничного слоя
- cp - средний

Качественные особенности закрученного потока указывают на то, что механизм проявления неустойчивости в нем должен быть иным, чем в прямолинейном течении. Это обусловлено тем, что при течении в трубе обтекание цилиндрической поверхности закрученным потоком происходит по винтовой линии с радиусом кривизны

$$R^* = \frac{R}{\sin^2 \gamma} \quad , \quad (1)$$

что аналогично течению вдоль вогнутой стенки.

В этом случае, как известно из [1], [2], в области пристенного течения вследствие неуравновешенности центробежной силы и поперечного градиента давления создаются условия, способствующие появлению неустойчивости, и закрученный поток может при определенных условиях сворачивать вправо и левосторонние вихри, направленные по вектору полной скорости. Такие вихри носят название вихрей Тейлора-Гертлера (ТГ). Проявление неустойчивости Тейлора-Гертлера можно ожидать в тех случаях, когда кривизна поверхности и число Re^{**} потока будут достаточно велики. В противном случае неустойчивость будет проявляться в виде роста волн Толлмина-Шлихтинга характерных для осевых потоков. Факт существования вихрей ТГ в криволинейных каналах на вогнутой поверхности в настоящее время считается установленным [1], [3], [4]. Для закрученных течений непосредственных подтверждений этого явления пока нет.

В работе [5] было высказано предположение об образовании вихрей ТГ в непосредственной близости от источника закрутки. Оно основывалось на анализе характера "теплого" отпечатка на поверхности теплоотдачи, однако количественные результаты не были представлены. В дальнейшем аналогичные заключения делались в [6], [7]

В настоящей работе представлены результаты определения интенсивности теплоотдачи в непосредственной близости от завихрителя ($\bar{x} < 2$). Как известно, по изменению интенсивности теплоотдачи в канале можно судить о смене режимов течения в пограничном слое. Достаточно точное измерение распределения плотности теплового потока в стенку канала в этой области может быть получено градиентным методом с повторным измельчением расчетной области в продольном и поперечном направлениях [5].

Подробное описание экспериментальной установки и исследованных завихрителей дано в работах [6], [7]. Ограничимся краткой характеристикой проведенных исследований. Диапазон изменения числа Re_d составлял от $0,5 \cdot 10^5$ до $1,5 \cdot 10^5$, температура воздушного по-

тока на входе поддерживалась постоянной ($\approx 200^\circ\text{C}$). Для исключения обратных течений на выходе из трубы устанавливались конические конфузоры с выходными диаметрами 40 и 60 мм.

Начальная закрутка потока осуществлялась лопаточными завихрителями с центральным телом. Лопатки завихрителя проектировались по закону $W_y z^n = \text{const}$, который при постоянной осевой скорости перед завихрителем позволяет получить степенной закон изменения конструктивного угла закрутки

$$\text{tg } \varphi = \text{tg } \varphi_n \left(\frac{R}{z} \right)^n, \quad (2)$$

что обеспечивалось соответствующим профилированием лопаток. В опытах значения φ_n изменялись от 15 до 60° , а n - от -1 до 3 . Обработка опытных данных по теплоотдаче проводилась на ЭВМ "М-222".

В исследованном диапазоне изменения Re_d, φ_n, n по длине трубы четко выделяются три области течения, разделенные экстремумами функции $\alpha(\bar{x})$ (рис. 1, 2). Характер протекания зависимости $\alpha(\bar{x})$ за максимумом не вызывает сомнений - это турбулентный режим течения, в котором закономерности теплоотдачи такие же как и при осевом течении ($Nu_x \sim Re_x^{0.8}$; $St \sim Re_r^{** - 0.25}$). Результаты исследования этой области и количественные соотношения рассмотрены подробно в работах [6], [7].

В области, расположенной между завихрителем и минимумом коэффициентов теплоотдачи ($0 < \bar{x} \leq \bar{x}_{кр}$), закономерности теплоотдачи выглядят иначе

$$Nu_x \sim Re_x^{0.7}; \quad St \sim Re_r^{** - 0.43}. \quad (3)$$

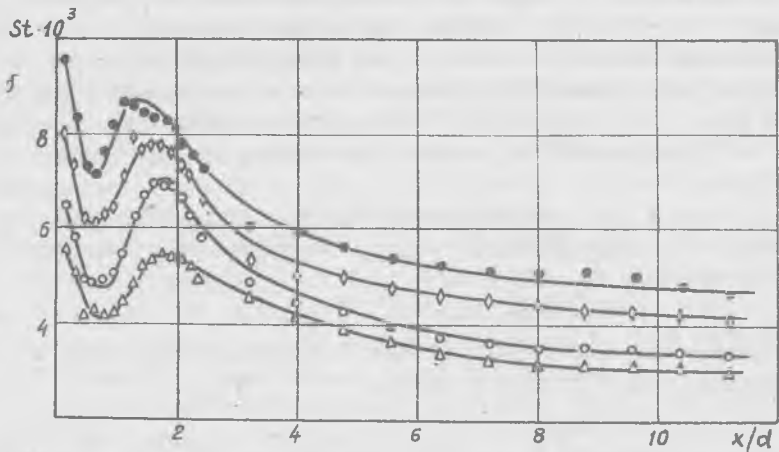
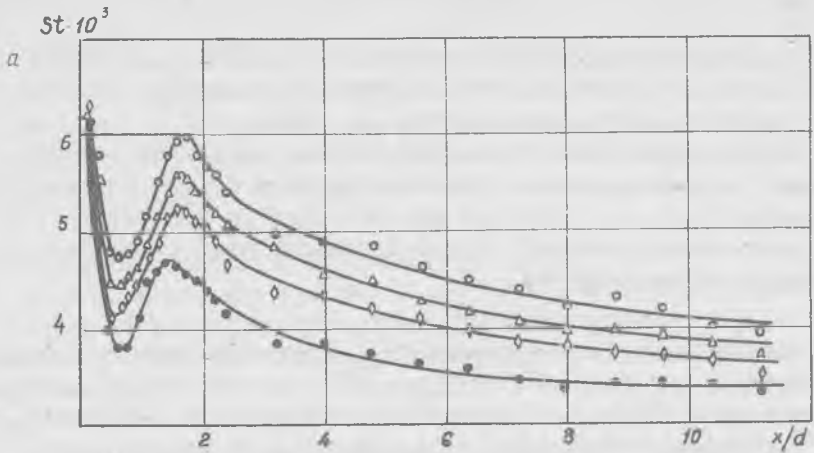
Заметим, что для осевого течения аналогичные соотношения в ламинарной области течения имеют вид

$$Nu_x \sim Re_x^{0.5}; \quad St \sim Re_r^{** - 1}. \quad (4)$$

Отличие показателей степеней в уравнениях (3) и (4) указывает на существование в рассматриваемой области режима течения закрученного потока, который отличается от обычного ламинарного, что позволяет предположить существование ламинарного режима с вихрями ТГ.

Условия возникновения вихрей ТГ определяются численным значением параметра "Гёртлера" [1], который для закрученного течения модифицируется следующим образом

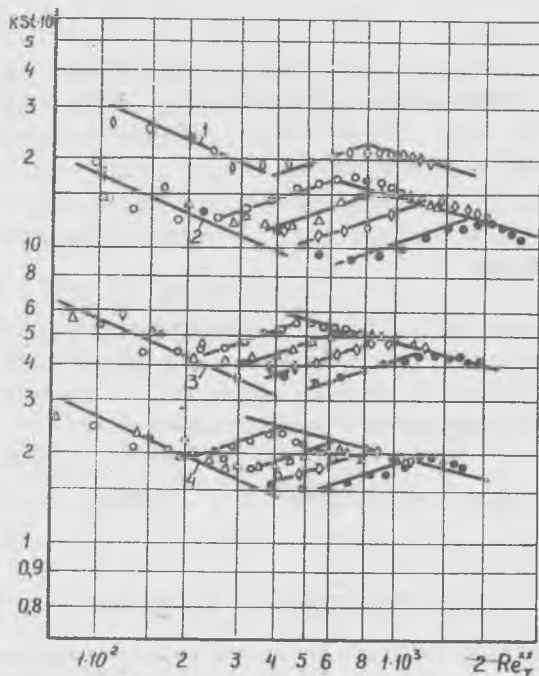
$$Go = \frac{W_{z0} \sigma_x^{**}}{\nu} \sqrt{\frac{\sigma_x^{**}}{R^*}}. \quad (5)$$



Р и с. 1. Изменение интенсивности теплоотдачи по длине канала при различных Re_d и γ_n n/m $n=1$, $\gamma_n = 45^\circ$

- $Re_d = 0,48 \cdot 10^5$, —△— $Re_d = 0,48 \cdot 10^5$, —◇— $Re_d = 1,07 \cdot 10^5$,
 —●— $Re_d = 1,44 \cdot 10^5$ (а); $n=3$, $d=40$ мм, $Re_d = 1,07 \cdot 10^5$, —△— $\gamma_n = 15^\circ$,
 —○— $\gamma_n = 30^\circ$, —◇— $\gamma_n = 45^\circ$, —●— $\gamma_n = 60^\circ$ (б)

Р и с.2. Характер изменения интенсивности теплоотдачи в различных зонах при $\gamma_H = 45^\circ$, $d = 40$ мм: 1- $n=0$, $\kappa=5$; 2- $n=3$, $\kappa=2$, 3- $n=1$, $\kappa=1$; 4- $n=1$; $\kappa=0,5$;
 -○- $Re_d = 0,48 \cdot 10^5$;
 -△- $Re_d = 0,73 \cdot 10^5$;
 -◇- $Re_d = 1,07 \cdot 10^5$;
 -●- $Re_d = 1,44 \cdot 10^5$.



Так как угол закрутки поперек пограничного слоя меняется очень слабо, то можно считать $\delta_x^{**} = \delta_x^{**}$. Учитывая, что в непосредственной близости от входа $\delta_x^{**} = \delta_r^{**}$ [10], выражение (5) можно записать так

$$\delta \delta = \sqrt{2} \operatorname{tg} \gamma_a Re_r^{**1,5} Re_{d_0}^{-0,5}. \quad (6)$$

Поскольку сведения по волновым числам имеются лишь в работе [1] для вогнутой стенки с $R^* = 5$ и 10 м (α соответственно 1,8 и 3,0 · 3,0 см⁻¹), то анализ устойчивости удастся провести только для одного завихрителя ($\gamma_H = 15^\circ$, $n = 3$). В этом случае при $\gamma_a = 6-8^\circ$ значение R^* составляет около 3;5 м. Для приближенных расчетов значения α можно принять равным 1,8 см⁻¹. Анализ диаграммы устойчивости [1], [2] показывает, что в области $0 < \bar{x} < \bar{x}_{кр}$ для рассматриваемого завихрителя возникшие случайные возмущения должны усиливаться, причем неустойчивость будет проявляться в форме вихрей ТГ.

В области $\bar{x}_{кр} < \bar{x} < \bar{x}_T$ располагается зона переходного течения.

Закономерности теплоотдачи здесь определяются следующим соотношением

$$Nu_x \sim Re_x^{1.5}$$

Аналогичная зависимость наблюдается и для осевого течения [9].

В рассматриваемых условиях положение координаты $\bar{x}_{кр}$ менялось очень слабо. Начало области ламинарного течения с вихрями ПГ определяется уравнением

$$(Re_{x_0})_{кр} = Re_{d_0} \quad (7)$$

Переход к турбулентному течению определяется следующим соотношением

$$(Re_{x_0})_r = (10,3 - 1,3 \operatorname{tg} \varphi_n) Re_{d_0}^{0,65}, \quad (8)$$

где изменение показателя интенсивности закрутки n не изменяет ширину зоны ламинарного и переходного течений.

Численные значения чисел Re_r^{**} , определяющих границы областей, можно определить по уравнениям

$$(Re_r^{**})_{кр} = M Re_d^{0,65}; \quad (Re_r^{**})_r = N Re_d^{0,65}, \quad (9)$$

в которых константы M и N находят из таблицы.

Т а б л и ц а

Зависимость констант от параметров

φ_n	60°	45°	45°	45°	15°
n	3	3	0	-1	3
M	0,3	0,25	0,2	0,2	0,2
N	0,76	0,63	0,5	0,5	0,5

Следует заметить, что число $(\theta_0)_{кр}$ в наших экспериментах достигало 37, тогда как из теории следует, что оно должно равняться 7 [2]. Отличие теоретических и экспериментальных данных обнаружено

также в работе [4], где получено $(\theta_0)_{кр} = 300$.

В области ламинарного течения с вихрями ПГ локальные коэффициенты теплоотдачи удовлетворительно обобщаются уравнениями

$$St = 0,9^{-n} (0,023 + 0,015 \operatorname{tg} \varphi_n) Re_r^{** - 0,45} \rho_2^{-0,75}; \quad (10)$$

$$Nu_x = 0,9^{-n} (0,082 + 0,055 \operatorname{tg} \varphi_n) Re_x^{0,7} \rho_2^{0,43}. \quad (11)$$

Для зоны переходного течения опытные данные описываются соотношением

$$Nu_x = 0,9^{-1} (1 + 1,74 \operatorname{tg} \varphi_H) 10^{-2} Re_x^{1,5} Pr^{0,43} \quad (12)$$

Характерной особенностью экспериментальных результатов в этой области является расслоение опытных данных для отдельных чисел Re_d для каждого завихрителя (см. рис.2).

В уравнениях (10) - (12) влияние неизотермичности течения на теплоотдачу исключено по рекомендациям, приведенным в работе [10].

Л и т е р а т у р а

1. *Jam J, Journ of Geophys. Res. Vol. 67, 1962, №8.*

2. Щ у к и н В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. М., "Машиностроение", 1970.

3. *Birres H., Götzel H. Acta Mech. Vol 14, 1972, №4.*

4. *Webkes H, Kellens m. Paper Amer. Soc. Mech Eng., HT-3, 1969.*

5. Гостинцев Ю.А., Зайцев В.М., Похил П.Ф. Возникновение турбулентности в пограничном слое на термически разлагающейся поверхности. ИЖ, т.ХVI, 1969, №5.

6. Голдобеев В.И., Щукин В.К., Халатов А.А., Экспериментальное исследование локального теплообмена в короткой трубе при местной закрутке потока. Труды Казанского авиационного института, вып.154, 1973.

7. Голдобеев В.И., Щукин В.К., Халатов А.А., Яшин А.П. Теплоотдача в начальном участке трубы при частичной закрутке газового потока на входе. Известия вузов, сер. "Авиационная техника", 1973, № 4.

8. Щукин В.К., Халатов А.А., Филин В.А. Градиентный метод исследования теплообмена в каналах переменного сечения. Известия вузов, сер. "Авиационная техника", 1969, № 4.

9. Сукомел А.С., Величко В.И. Экспериментальное исследование локальной теплоотдачи при течении воздуха на начальном участке трубы. "Теплотехника", 1969, № 4.

10. Куташеладзе С.С., Леонтьев А.И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М., "Энергетика", 1972.