

Х. НУРСТЕ

ЗАТУХАНИЕ ЗАКРУТКИ ПОТОКА В ТРУБЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

Введение

Применение закручивания потока в горелках котельных агрегатов, в циклонных топках, в камерах сгорания газовых турбин, в теплообменниках позволяет интенсифицировать и регулировать процессы тепло-массообмена и горения в больших по сравнению с незакрученными потоками пределах. Ограниченность объема большинства технических вихревых камер и необходимость форсирования в нем процессов тепло-массообмена и сгорания выдвигает требование четкого распределения потоков, в том числе создания потоков требуемой закрутки. Несоблюдение этого требования может привести к недопустимому увеличению размеров камеры, прогоранию ее стенок, образованию нагара и другим нежелательным последствиям.

В ряде работ, посвященных исследованию закрученного потока как в коротких циклонных камерах и амбразурах горелок [1, 2], так и в длинных трубах [3, 4], было установлено, что на аэродинамическую структуру закрученного потока влияют, в частности, конструктивные параметры закручивателя ($F_{вх}/F$), камеры (L/R ; Δ/R) и выхода ($R_{вых}/R$). Структура закрученного потока, особенно в относительно коротких диафрагмированных камерах ($L/R < 4$), существенно зависит от торцевых перетечек, вызываемых торможением части потока на торцевых поверхностях [5], и от конструктивных особенностей установки. Эта зависимость аэродинамических величин и трехмерность их полей сильно затрудняют обобщение экспериментальных данных и построение математической модели процесса. В данной работе представлены результаты исследования затухания закрутки потока в трубе при различных начальных уровнях закрутки.

Экспериментальная часть

Опыты проводились на установке, представляющей собой круглую трубу диаметром 0,205 м и длиной 12 м ($L/R = 117$). Поток закручивался около одного закрытого конца трубы путем подачи его через два тангенциальных сопла с переменной суммарной относительной площадью выхода $F_{вх}/F = 0,388; 0,292; 0,184; 0,096$. Шероховатость трубы имела значение $\Delta/R = 0,15\%$. Поля скоростей и статического давления в поперечных сечениях трубы измерялись сферическим зондом по обычной методике. Для исключения из рассмотрения начальной неравномерности потока у входных сопел, зависящей от конструктивных особенностей закручивателя, предельное расстояние от кромки сопел, на котором проводились измерения, составляло $6,8 R$. Последнее измере-

ние проводилось на расстоянии $6R$ от открытого конца трубы. Была установлена симметричность потока относительно оси трубы. Наблюдалась также автомодельность полей скоростей и давлений, не зависящая от расхода воздуха ($Re = v_{вх}R/\nu > 1,5 \cdot 10^5$).

Обсуждение результатов

Для описания осесимметричного изотермического турбулентного закрученного потока можно использовать уравнения движения и неразрывности в цилиндрических координатах. Опустив члены с производными по φ (благодаря симметрии потока) и члены высших порядков малости, можно записать

$$\frac{v_\varphi^2}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (1)$$

$$v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + v_x \frac{\partial v_\varphi}{\partial x} + \frac{v_r v_\varphi}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\varphi r}}{\partial r} + \frac{2}{\rho} \frac{\tau_{\varphi r}}{r}, \quad (2)$$

$$v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xr}}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\tau_{xr}}{r}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{v_r}{r} = 0, \quad (4)$$

где $\tau_{\varphi r}$ и τ_{xr} обозначают компоненты напряжения трения в потоке.

Из этих дифференциальных уравнений выводятся уравнения для интегралов движения закрученного потока в трубе. Подставляя умноженное на v_x уравнение (4) в (2) и интегрируя последнее в пределах от 0 до R , получим

$$\frac{d}{dx} \int_0^R \rho r^2 v_x v_\varphi dr = -T_\varphi R^2. \quad (5)$$

Аналогично, используя уравнение непрерывности, из (3) получим

$$\frac{d}{dx} \int_0^R r(p + \rho v_x^2) dr = -T_x R. \quad (6)$$

Левые части уравнений (5) и (6) представляют собой изменение, соответственно, момента количества движения потока M и аксиальной составляющей количества движения I , а правые части — компоненты силы трения потока в пристеночном пограничном слое. Отметим, что согласно некоторым гипотезам [6], значительная часть потерь давления в сильно закрученном потоке обусловлена турбулентной диссипацией в объеме потока.

Из уравнений (5) и (6) после интегрирования и соответствующих преобразований можно получить уравнение изменения безразмерного параметра кривки потока

$$\frac{M}{IR} = \frac{M_0 - R^2 \int_0^x T_\varphi dx}{R(I_0 - R \int_0^x T_x dx)}. \quad (7)$$

На рис. 1, 2 и 3 представлены экспериментальные данные изменения вдоль трубы интегральных параметров, приведенных к безразмерному виду

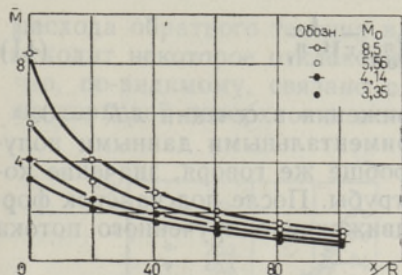


Рис. 1. Изменение момента количества движения закрученного потока вдоль трубы.

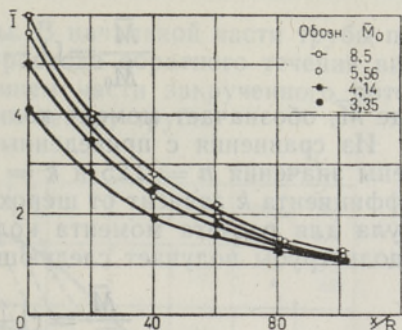


Рис. 2. Изменение аксиальной компоненты количества движения закрученного потока вдоль трубы.

$$\bar{M} = \frac{3M}{2\pi Q v_{cp}^2 R^3}; \quad \bar{I} = \frac{I}{\pi Q v_{cp}^2 R^2}. \quad (8)$$

В качестве масштабных величин использованы среднерасходная аксиальная скорость в трубе v_{cp} и радиус трубы R . Значения \bar{M} и \bar{I} получены путем численного интегрирования кривых скоростей и давления. На всех рисунках началу отсчета $x/R = 0$ соответствует сечение, находящееся на расстоянии $8,6 R$ от начала трубы (от кромки сопел на расстоянии $6,8 R$). Как видно на рисунках, с уменьшением $F_{вх}/F$ уровень закрутки повышается и ее затухание происходит более интенсивно. Так как в выражение для \bar{I} входит статическое давление в потоке p , которое в данном сечении зависит от общей длины трубы, то и значение безразмерного параметра M/IR зависит от длины трубы. Поэтому целесообразнее использовать для характеристики закрученности потока величину \bar{M} .

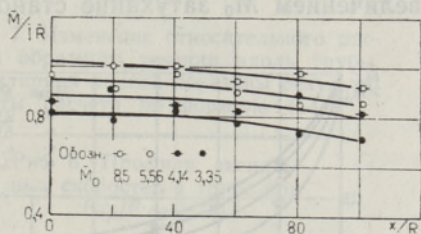


Рис. 3. Изменение безразмерного параметра крутки закрученного потока вдоль трубы.

Затухание значения \bar{M} вдоль трубы может быть оценено следующим способом. Тангенциальная составляющая силы трения в турбулентном пограничном слое закрученного потока приближенно пропорциональна квадрату тангенциальной скорости на внутренней границе пристеночного пограничного слоя. Тангенциальная скорость определяется уровнем крутки потока, т. е. величиной \bar{M} , и эту связь можно аппроксимировать степенной зависимостью. Таким образом,

$$T_{\phi} R^2 \sim \rho (r v_{\phi})_{\max}^2 \sim \left(\frac{M}{R} \right)^n \quad (9)$$

и уравнение (5) в безразмерном виде запишется так:

$$\frac{d\bar{M}}{dx} = -k\bar{M}^n, \quad (10)$$

где k — коэффициент пропорциональности. После интегрирования (10) получим

$$\frac{\bar{M}}{\bar{M}_0} = [1 - (1 - n)k\bar{M}_0^{n-1}\bar{x}]^{\frac{1}{1-n}}, \quad (11)$$

где \bar{M}_0 обозначает момент количества движения в сечении $x/R = 0$.

Из сравнения с приведенными экспериментальными данными получены значения $n = 2,25$ и $k = 0,0055$. Вообще же говоря, значение коэффициента k зависит от шероховатости трубы. После подстановок формула для расчета момента количества движения закрученного потока вдоль трубы получает следующий вид:

$$\frac{\bar{M}}{\bar{M}_0} = (1 + 0,00685\bar{M}_0^{1,25}\bar{x})^{-0,8}. \quad (12)$$

На рис. 4 показано сравнение формулы (12) с опытными данными. Значения величины \bar{M}_0 составляли 3,35; 4,14; 5,56; 8,5. Как видно, с увеличением \bar{M}_0 затухание становится более интенсивным.

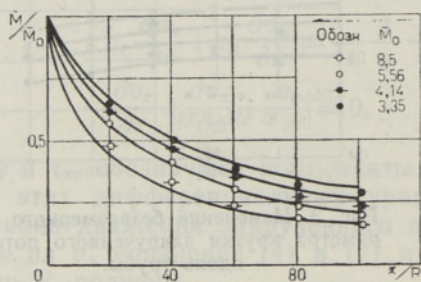


Рис. 4. Сравнение расчета по формуле (12) с опытными данными.

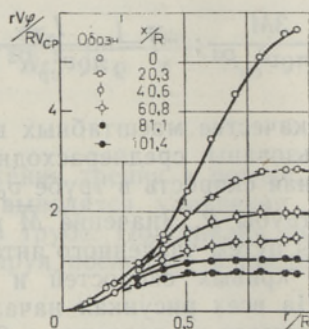


Рис. 5. Профили циркуляции скорости в трубе при $F_{vx}/F = 0,096$.

На рис. 5 приведены профили циркуляции скорости rv_ϕ/Rv_{cp} в сечениях трубы при $F_{vx}/F = 0,096$. В периферийной части трубы характер потока становится близким к потенциальному. По мере затухания закрутки потока эта зона расширяется в сторону оси. Аналогичная картина наблюдается и при других значениях F_{vx}/F . Только при увеличении значения F_{vx}/F поток меньше прижимается к стенке, профили циркуляции скорости становятся более равномерными и зона потенциального движения расширяется. Максимальное значение циркуляций скорости в периферийной части потока может быть рассчитано по формуле

$$\frac{(rv_\phi)_{\max}}{Rv_{cp}} = \frac{c\bar{M}_0^{1,125}}{(1 + 0,00685\bar{M}_0^{1,25}\bar{x})^{0,9}}, \quad (13)$$

полученной с использованием формул (9) и (12), где $c = 0,564$.

Профили аксиальных скоростей изменяются вдоль трубы слабее тангенциальных. На рис. 6 приведены профили аксиальных скоростей при $F_{vx}/F = 0,096$. Как видно, основная масса закрученного потока движется вдоль периферии трубы. С затуханием закрутки потока сечение трубы заполняется более равномерно.

Важным свойством закрученного потока является наличие в нем обратных течений. На рис. 7 представлено изменение относительного

расхода обратного течения вдоль трубы. В начальной части трубы происходит некоторое отклонение кривых расхода обратного течения вниз, что, по-видимому, связано с торможением части закрученного потока на торцевой поверхности и перетечкой к центру трубы.

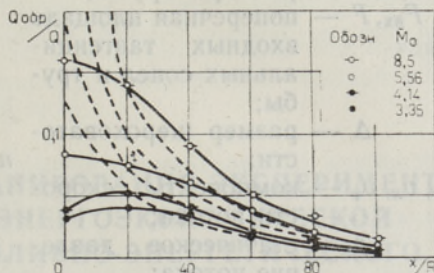
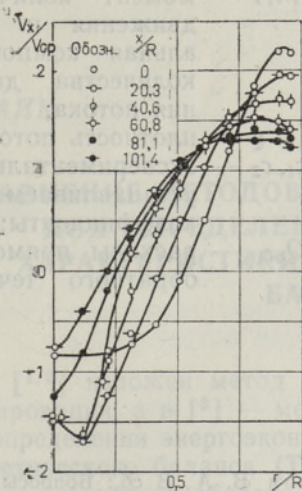


Рис. 7. Изменение относительного расхода обратного течения вдоль трубы. Пунктирной линией показаны результаты расчета по формуле (14).

Рис. 6. Профили аксиальных скоростей в трубе при $F_{вх}/F = 0,096$.

В условиях данного эксперимента обратное течение является результатом разности статических давлений, возникающей из-за действия центробежных сил. В центре трубы и около стенки эта разность обусловлена круткой потока. Вследствие затухания закрутки возникает также значительный осевой градиент давления, который около стенки трубы направлен против аксиального движения потока, а в центре трубы — вдоль него. Существование этих градиентов и обуславливает возникновение обратного течения, которое, по существу, является рециркуляционным.

Для получения зависимости величины обратного течения от степени закрутки можно воспользоваться уравнением (3). Осевой компонентой турбулентного напряжения трения в потоке можно пренебречь, так как ее влияние на радиальный градиент давления незначительно. Малым является также первый член левой части уравнения (3), содержащий радиальную скорость v_r . Полученное уравнение импульсов можно приближенно преобразовать к виду, содержащему расходы Q и $Q_{обр}$. Окончательно формула для расчета величины обратного течения имеет вид

$$\frac{Q_{обр}}{Q} = \frac{c_1 \frac{\bar{M}_0^{2,25}}{(1+0,00685\bar{M}_0^{1,25}x)^{1,8}} - c_2}{c_1 \frac{\bar{M}_0^{2,25}}{(1+0,00685\bar{M}_0^{1,25}x)^{1,8}} + 2 - c_2}, \quad (14)$$

где $c_1 = 0,021$, $c_2 = 0,012$.

Обратное течение возникает при $\bar{M} = 0,73$. На рис. 7 пунктирной линией представлены результаты расчета по формуле (14). В начальной части трубы эксперимент и расчет расходятся. В остальной же области течения формула (14) дает удовлетворительное совпадение с опытными данными.

Обозначения

r, x, φ — цилиндрические координаты;	$\Gamma_{\varphi}, \Gamma_x$ — компоненты сил трения на стене трубы;
R, L — размеры трубы;	M, I — момент количества движения и аксиальная компонента количества движения потока;
$F_{вх}, F$ — поперечная площадь входных тангенциальных сопел и трубы;	ρ — плотность потока;
Δ — размер шероховатости;	n, k, c, c_1, c_2 — экспериментально устанавливаемые коэффициенты;
v_r, v_x, v_{φ} — компоненты скорости потока;	$Q, Q_{обр}$ — расходы прямого и обратного течения.
p — статическое давление потока;	
$\tau_{\varphi r}, \tau_{xr}$ — компоненты напряжения трения потока;	

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Ю. В., Кацнельсон Б. Д., Павлов В. А., В сб.: Вопросы аэродинамики и теплопередачи в котельно-топочных процессах, М., 1958; Ляховский Д. Н., там же; Нахапетян Е. А., там же.
2. Ахмедов Р. Б., Дутьевые газогорелочные устройства, М., 1970.
3. Алимов Р. З., Инж.-физ. ж., X, № 4 (1966).
4. Rochino A., Lavan Z., Trans. ASME, No. 2 (1969).
5. Михайлов П. М., Деветерикова М. И., Роменский А. А., Энерготехнологические циклонные процессы и установки, М., 1970.
6. Кнорре Г. Ф., Арефьев К. М., Блох А. Г., Нахапетян Е. А., Палеев И. И., Штейнберг В. Б., Теория топочных процессов, М., 1966.

Институт термofизики и электрофизики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
18/VII 1972

H. NURSTE

PÖÖRISTATUD VOOLUSE PÖÖRISE KUSTUMINE VOOLAMISEL UMMARGÜSË TORUS

Esitatakse eksperimentaalandmed pöörisevooluse liikumishulga momendi, teljelise liikumishulga, parameetri M/IR ja kiirusväljade komponentide kustumise kohta torus mitmesugustel pöörise algsuurustel.

Toru karedus $\Delta/R = 0,15\%$. Antakse ka arvutusvalemid.

H. NURSTE

DECAY OF THE SWIRL IN THE SWIRLING FLOW IN A ROUND TUBE

Experimental data of the decay of angular momentum, axial momentum, the parameter M/IR and velocity profiles are presented at various initial rates of swirl. The roughness of the tube had a value of $\Delta/R = 0.15\%$. Corresponding formulae are derived.