

М. Л. Шустрова, А. С. Понкратов, Д. А. Кульдюшов

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВХОДНЫХ КОНФУЗОРОВ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ*Ключевые слова: конфузор, турбулентный режим, профиль скорости, коэффициент расхода.*

В статье приведен сравнительный анализ газодинамических характеристик нормального конфузора и конфузора с минимумом поверхности различных модулей при турбулентном режиме течения. Показана эволюция ряда параметров по длине каналов под влиянием продольного градиента давления.

Keywords: konfuzor, turbulent flow, velocity profile, discharge coefficient.

This paper contains a comparative analysis of gas-dynamic characteristics of a normal konfuzor and a minimum-surface konfuzor with a various modules on a turbulent mode. The influence of a longitudinal pressure gradient on evolution of a number parameters is shown.

Введение

Конфузоры – сужающиеся каналы, широко применяемые в промышленности для создания ровного профиля скоростей на выходе данных устройств. Области применения конфузоров достаточно многообразны: их используют в силовых установках и в химической промышленности, авиации и расходомерии, а также во множестве различных бытовых устройств. При всем имеющемся на сегодняшний день разнообразии данных входных устройств – конструктивно они различаются только формой канала. Однако от геометрии профиля образующей конфузора во многом зависят его газодинамические характеристики и, следовательно, эффективность его использования в различных устройствах.

Особенности течения газа в конфузорах таковы, что на входе кинематическая структура потока равномерна, а по мере движения вдоль продольной координаты нарастает пограничный слой, толщина которого при турбулентном режиме невелика. При больших числах Рейнольдса скорость потока в сечении конфузора возрастает от нуля у стенки канала до скорости турбулентного ядра потока достаточно быстро, и профиль скоростей имеет логарифмический вид. Толщина пограничного слоя на входе конфузора (т.е. при $x = 0$) равна нулю, а темп его нарастания на стенке в силу вязкости газа подавляется действием отрицательного продольного градиента давления.

В представленной работе приведены результаты расчета основных газодинамических характеристик течения газа в сужающихся каналах при турбулентном режиме течения. Показан характер эволюции числа Рейнольдса, построенного по толщине потери импульса, параметра продольного градиента давления, формпараметра $H(x)$ и относительного коэффициента трения по длине канала для конфузора нормальной геометрии и конфузора с минимумом поверхности.

Аналитическое исследование турбулентного течения в конфузорных каналах

Характеристикой деформации поля скоростей в конфузоре выступает толщина потери импульса или число Рейнольдса, построенное по толщине потери импульса. Эти значения может быть

получены в результате совместного решения уравнений движения и неразрывности, для конфузорного течения имеющих вид:

$$\frac{d Re^{**}}{dX} + \frac{Re^{**}}{W_0} (1+H) \frac{dW_0}{dX} + \frac{Re^{**}}{r(x)} \frac{dr(x)}{dX} = \frac{C_f}{2} \Psi W_0 Re_1 \quad (1)$$

$$\frac{dW_0}{dX} = \left(\frac{4H Re^{**}}{Re_1 r(x)^2} - \frac{2W_0}{r(x)} \right) \frac{dr(x)}{dX} + \frac{4H}{Re_1 r(x)} \frac{d Re^{**}}{dX} + \frac{4 Re^{**}}{Re_1 r(x)} \frac{dH}{dx} \quad (2)$$

В (1) и (2) принято, что $Re^{**} = \frac{\omega_0 \delta^{**}}{\nu}$;

$$X = \frac{x}{2r_{01}}; \quad W(x) = \frac{\omega(x)}{\omega_{01}}; \quad \bar{r}(x) = \frac{r(x)}{r_{01}};$$

$$\Psi = \frac{C_f}{C_{f_0}} Re_1 = \frac{\omega_{01} r_{01}}{\nu}; \quad \mu = \nu \rho; \quad H = \frac{\delta^*}{\delta^{**}} -$$

формпараметр; закон трения при турбулентном режиме течения принимает вид $\frac{C_f}{2} = \frac{0,0128}{Re^{**0,25}}$

Решение данной системы было реализовано в пакете Wolfram Mathematica.

На рис. 1 приведен ход эволюции числа Рейнольдса, построенного по толщине потери импульса в функции продольной координаты для конфузора. Наблюдается для всех модулей тренд в сторону увеличения числа Re^{**} . При этом сохраняется потенциальное ядро потока.

Как видно из рис.1, наиболее значительный рост Re^{**} характерен для нормального конфузора, в то время, как для конфузора с минимальной поверхностью значения данного параметра для модулей 0,145, 0,25, 0,5 и 0,75 расположены достаточно близко друг к другу и принимают меньшие значения. Значительный рост числа Рейнольдса по толщине потери импульса, видимо, обязан соответствующему росту скорости. Если при

ламинарном течении толщина пограничного слоя составляла порядка 30% радиуса сечения, то при турбулентном режиме данная величина близка к нулю, и в непосредственной близости к стенке трубопровода начинают проследиваться турбулентные проявления. Уменьшение толщины пограничного слоя говорит о большей заполненности профиля скоростей. Так, для конфузора *minrov* толщина пограничного слоя будет меньше, чем у нормального конфузора, а, следовательно, и профиль скоростей в случае *minrov* будет более равномерным.

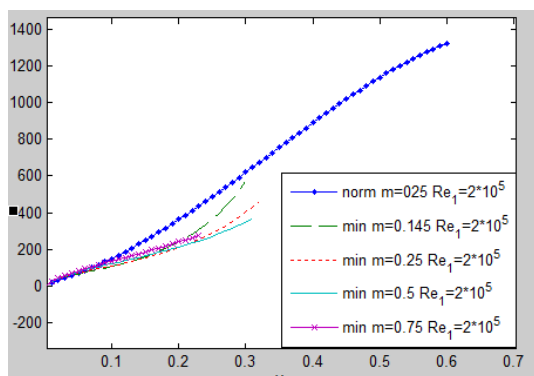


Рис. 1 - Характер нарастания числа Рейнольдса по длине потери импульса по продольной координате *x* конфузора для различных значений *Re* и модулей

Величина формпараметра *H*, определяемая отношением толщины потери энергии к толщине потери импульса, ввиду воздействия продольного градиента давления, будет изменяться вдоль продольной координаты конфузора.

На заполненность профиля скоростей оказывает большое влияние величина отрицательного продольного градиента давления. На Рис.2 показана эволюция параметра продольного градиента давления по длине сравниваемых конфузоров. Из графика видно, что при увеличении модуля конфузора данный параметр уменьшается. В то же время, при сравнении конфузоров одного модуля величина параметра продольного градиента давления для конфузора *minrov* несколько больше, чем для нормального конфузора. В работе [1] показано, что при увеличении λ профиль скоростей становится более заполненным. Следовательно, кинематическая структура потока для конфузора *minrov* будет более однородной. При увеличении числа Рейнольдса входного потока или модуля конфузора при этом наблюдается тенденция уменьшения абсолютного значения параметра продольного градиента давления.

На рис.2 показана эволюция данного параметра по длине сравниваемых конфузоров. Из графика видно, что при увеличении модуля конфузора данный параметр уменьшается. В то же время, при сравнении конфузоров одного модуля величина параметра продольного градиента давления для конфузора *minrov* несколько больше, чем для нормального конфузора. В работе [1] показано, что при увеличении λ профиль скоростей становится более заполненным. Следовательно, кинематическая структура потока для конфузора *minrov* будет более

однородной. При увеличении числа Рейнольдса входного потока или модуля конфузора при этом наблюдается тенденция уменьшения абсолютного значения параметра продольного градиента давления.

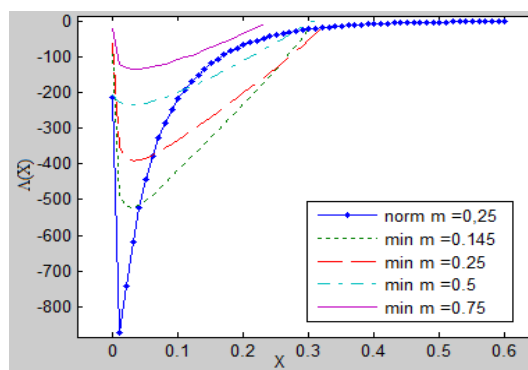


Рис. 2 - Эволюция параметра продольного градиента давления по длине конфузоров

При большей заполненности профиля скоростей увеличивается также один из основных качественных характеристик конфузоров-коэффициент расхода, определяемый как отношение действительного расхода к теоретическому. Поскольку профиль скоростей для конфузора *minrov* ожидается более равномерным, значение коэффициента расхода, определяемое отношением среднерасходной скорости к скорости на оси, также будет выше:

$$\alpha = \frac{G_d}{G_t} = \frac{\int_0^{r_0} 2\pi r \omega_x dr}{2\pi r \omega_0}$$

На рис.3 показано изменение коэффициента расхода для конфузоров *minrov* модулей 0,145, 0,25, 0,5 и 0,75и нормального конфузора модуля 0,25 по продольной координате для *Re* 100 000.

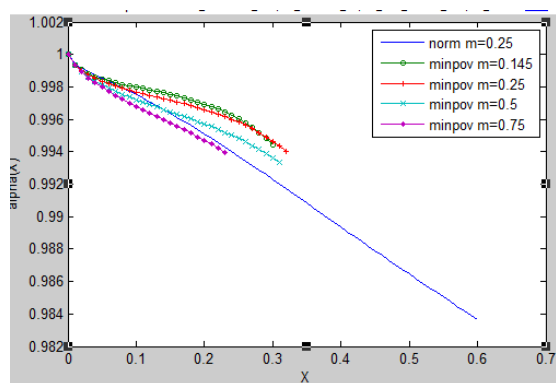


Рис. 3 – Эволюция коэффициента расхода по длине конфузора

Как видно из графика, на входе конфузора данный параметр равен единице, постепенно уменьшаясь по мере приближения к выходному сечению. Это связано с тем, что вдоль продольной координаты конфузора наряду с ростом скорости потока происходит нарастание пограничного слоя, в котором скорость потока меняется от нуля на стенке

до скорости ядра потока. Так, при $Re = 100\,000$ на входе конфузора толщина пограничного слоя равна нулю, и профиль скоростей равномерен, на выходе же величина данного параметра доходит до 2-4% радиуса сечения. Увеличение значения критерия Рейнольдса входного потока ведет к уменьшению толщины пограничного слоя и увеличению коэффициента расхода.

Меньшее значение коэффициента расхода на выходе конфузора (0,9837) соответствует устройству с нормальной геометрией, для конфузора $\min_{\text{пров}}$, в свою очередь, для различных модулей стабильно сохраняется более высокое значение коэффициента расхода 0,9934-0,9944.

Следует также отметить, что при увеличении числа Рейнольдса входного потока наблюдается тенденция увеличения значения коэффициента расхода.

Проведение эксперимента

В рамках данной работы был изготовлен конфузор с минимальной поверхностью модуля 0,145 и входного диаметра 25мм. Вывод профиля образующей указанного конфузора приведен в работе [4], его радиус по продольной координате меняется следующим образом:

$$\bar{r}(X) = \sqrt{m}Ch \left[\frac{2(X - \frac{\sqrt{m}}{2} \operatorname{arccosh}(m^{-0.5}))}{\sqrt{m}} \right]$$

где m – модуль конфузора.

$$\bar{\ell} = \frac{\sqrt{m}}{2} \operatorname{arccos} h(1/\sqrt{m})$$

- длина конфузора, приведенная к входному его диаметру. Для модуля 0,145 составляет 0,3073.

В результате проведения серии продувок на базе Всероссийского Научно-Исследовательского Института Расходомерии и обработки полученных результатов, было выяснено, что коэффициент расхода в выходном сечении для конфузора $\min_{\text{пров}}$ модуля 0,145 составляет 0,9936.

Выводы

В результате проведения анализа ряда газодинамических характеристик течения газа в нормальном конфузоре и конфузоре с минимумом поверхности различных модулей, следует отметить, что во всех рассмотренных каналах наблюдается значительный рост числа Re^{**} по толщине потери импульса. Ввиду незначительности толщины пограничного слоя профиль скоростей в турбулентном режиме более равномерен. Влияние продольного градиента давления наиболее существенно на начальном участке конфузора, когда угол наклона образующей максимален, после чего на более пологом участке абсолютная величина параметра продольного градиента давления уменьшается.

Анализ изменения коэффициента расхода по длине конфузора показал, что по мере отдаления от входа конфузора данный параметр уменьшается ввиду формирования пограничного слоя. Однако, влияние продольного градиента давления препятствует значительному его нарастанию по длине канала. Поэтому значение коэффициента расхода в выходном сечении конфузора принимает достаточно высокие значения: 0,9934-0,9944 для конфузора с минимальной поверхностью и 0,9837 для нормального конфузора. Разница может оказать ощутимое влияние на КПД энергетических систем. Результаты расчетов хорошо подтверждаются данными, полученными при проведении эксперимента.

Литература

1. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Турбулентный пограничный слой сжимаемого газа // Новосибирск: Изд. СО АН СССР, 1962. – С. – 180.
2. Фафурин А.В. Методы и средства измерения расхода газа. Методические указания // КХТИ. Казань. – 1977. С.40.
3. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое //
4. Фафурин А.В. Газодинамические характеристики входных конфузоров // А.В. Фафурин, Р.Р. Тагиров, М.Л. Шустрова // Вестник Казан. технол. ун-та – 2012.- №8.- с. 323-326
5. Фафурин А.В. Пульсации параметров энергоустановок как средство управления и экономики /А.В. Фафурин, Я.З. Гузельбаев // Вестник Казан. технол. ун-та – 2011.- №15.- с.256-259