

## УСКОРЕНИЕ ПОТОКА КАК ФАКТОР ВЛИЯНИЯ НА КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЯ

*Ключевые слова: конфузор, отрицательный градиент давления, пограничный слой, профиль скоростей.*

*В статье приведен сравнительный анализ кинематических характеристик конфузоров с разными профилями при турбулентном режиме течения. Показана эволюция параметра продольного градиента давления по продольной координате и вызванные этим изменения скорости потока.*

*Keywords: downstream pressure gradient, boundary layer, velocity profile.*

*This paper contains a comparative analysis of gas-dynamic characteristics of a turbulent flow on konfuzors with different profiles. The evolution of downstream pressure gradient and its influence on velocity characteristics is shown.*

### Введение

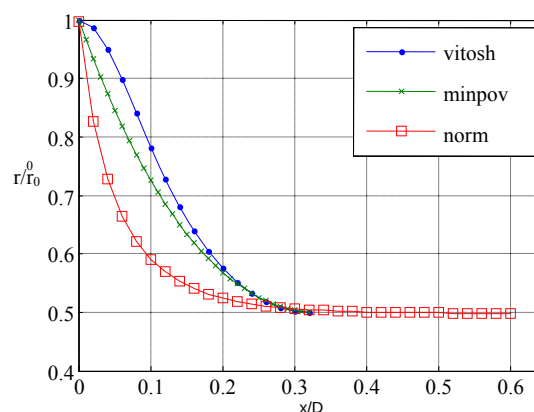
В современной технике широко применяются конфузоры - каналы переменного сечения, сужающиеся по направлению потока. Они используются в качестве направляющих аппаратов в центробежных и осевых компрессорах, вентиляторах и градирнях, аэродинамических трубах. Особенностями применения конфузоров является то, что поток поступает в них из больших объемов.

На гидродинамические характеристики течения в указанных устройствах большое влияние оказывают геометрические особенности канала и характеристики потока на входе устройства. На сегодняшний день существует большое количество различных типов конфузорных каналов, среди которых сопла Вентури, конические и коноидальные устройства, экспоненциальные и радиусные, сопла Витошинского и сопла Лавалья, и многие другие. Все они имеют свои особенности построения и области применения.

Что касается характеристик потока на входе канала – при рассмотрении течения в конфузоре без начального участка профиль скоростей на входе устройства будет равномерным, пограничный слой не сформирован, толщины вытеснения и потери импульса равны нулю. Формирование пограничного слоя в данном случае будет происходить по мере прохождения потока по каналу. При рассмотрении течения в соплах при наличии предвключенного участка, наоборот, во входном сечении канала имеет место сформированный пограничный слой и логарифмический профиль скоростей поперек турбулентного подслоя.

### Течение газа в условиях отрицательного продольного градиента давления

Рассмотрим в данной работе течение в конфузорах трех типов: нормальном (в [1] он обозначен как ИСА1932), конфузоре с профилем Витошинского [2] и конфузоре, обеспечивающем минимум внутренней поверхности (далее будем обозначать его как minpov). Профили данных сужающих устройств представлены на рис.1.



**Рис. 1 - Профили рассматриваемых конфузоров**

Течение в конфузорных каналах происходит под влиянием отрицательного продольного градиента давлений, пропорционального кривизне профиля конфузора. Значение параметра продольного градиента давления в может быть вычислено по формуле[4]

$$\lambda = \frac{-2}{c_f} \frac{\delta}{w} \frac{\partial w}{\partial x} \quad (1)$$

Характер изменения скорости потока по продольной координате можно выяснить, рассчитав величину критерия Рейнольдса для i-го сечения конфузора. Данный расчет сводится к совместному решению уравнений движения и неразрывности, для конфузорного течения без предвключенного участка имеющих вид[3]:

$$\frac{d Re^{**}}{dX} + \frac{Re^{**}}{W_0} (1+H) \frac{dW_0}{dX} + \frac{Re^{**}}{r(x)} \frac{dr(x)}{dX} = \frac{C_{f0}}{2} \Psi W_0 Re_1 \quad (2)$$

$$\frac{dW_0}{dX} = \left( \frac{4H \text{Re}^{**}}{\text{Re}_1 \bar{r}(x)^2} - \frac{2W_0}{\bar{r}(x)} \right) \frac{d\bar{r}(x)}{dX} +$$

$$+ \frac{4H}{\text{Re}_1 \bar{r}(x)} \frac{d\text{Re}^{**}}{dX} + \frac{4\text{Re}^{**}}{\text{Re}_1 \bar{r}(x)} \frac{dH}{dX} \quad (3)$$

В (1) и (2) принято, что

$$\text{Re}^{**} = \omega_0 \delta^{**} / \nu; \quad X = x / 2r_{01};$$

$$W(X) = \omega(x) / \omega_{01}; \quad \bar{r}(x) = r(x) / r_{01}; \quad (4)$$

$$\Psi = c_f / c_{f_0} \quad \text{Re}_1 = \omega_{01} r_{01} / \nu$$

$$H = \frac{\delta^*}{\delta^{**}} \text{ - формпараметр;}$$

При турбулентном режиме течения закон трения в стандартных условиях принимает вид

$$\frac{c_f}{2} = \frac{0,0128}{\text{Re}^{**0,25}}$$

С учетом (4), выражение расчета параметра продольного градиента давления принимает вид

$$\lambda = \frac{-2 \delta \bar{r}_0}{c_f \bar{r}_0} \frac{1}{2} \frac{\partial W}{\partial X} \quad (5)$$

Учитывая, что параметр  $c_f$  при течении в конфузорах отличается от значения в стандартных условиях  $c_{f_0}$ , для его оценки были аппроксимированы данные, приведенные в [5]. Эволюция изменения параметра продольного градиента давления при конфузоре течении без начального участка представлен на рис.2. Как видно из графиков, характер изменения данного параметра для всех рассматриваемых конфузоров имеют общие тенденции, однако линии не совпадают. В начальной части конфузоров, вместе с ростом производной радиуса конфузора по продольной координате, происходит увеличение абсолютного значения параметра  $\lambda$ , после чего на более пологом участке значение  $\lambda$  плавно возвращается к нулю в выходном сечении.

В работе [3] показано, что увеличение  $\lambda$  приводит к утончению пограничного слоя, и, как следствие, к тому, что профиль скоростей в поперечном сечении пограничного слоя 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.

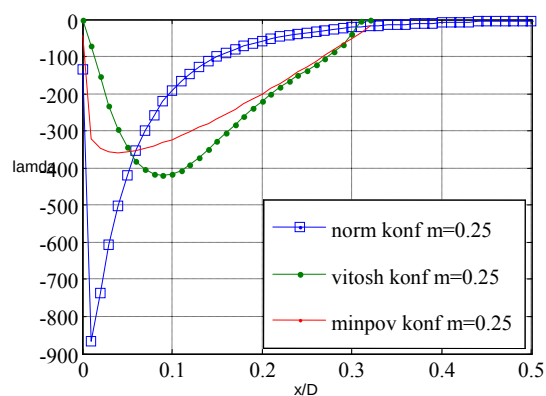


Рис. 2 - Эволюция параметра продольного градиента давления по продольной координате конфузора

### Влияние ускорения на кинематические характеристики потока

Ускорение потока при движении в сужающихся каналах происходит под воздействием отрицательного продольного градиента давления. Следовательно, изменение скорости на оси потока по продольной координате в рассматриваемых конфузорах будет иметь несколько различный характер. На рис.3 представлена эволюция изменения отношения скорости по оси потока к скорости во входном сечении рассматриваемых конфузоров в функции продольной координаты канала. Из графиков видно, что возрастание скорости в устройствах одного модуля происходит до весьма близких значений, однако интенсивность изменения данного параметра для различных устройств не одинакова, и участки с наибольшим ускорением потока соответствуют участкам рис.2 с наибольшими абсолютными значениями параметра продольного градиента давления.

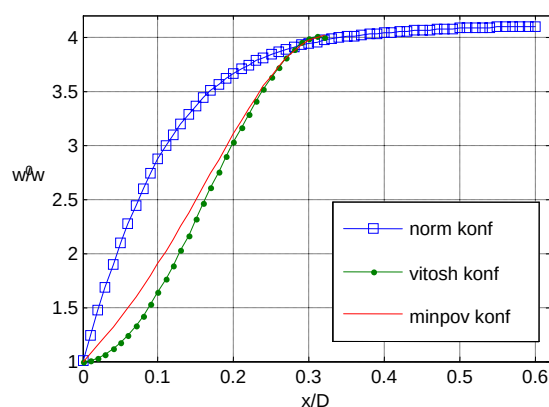


Рис. 3 – Эволюция скорости потока на оси по продольной координате конфузора

На рис 4 приведены профили скоростей в выходном сечении рассматриваемых конфузоров. Учитывая, что толщина пограничного слоя для конфузоров minrov и Витошинского модулей 0.25 в выходном сечении составляет 3,98 и 4,02%, а для нормального конфузора - 13%, из рис.3 можно

сделать вывод, что профили скоростей первых двух типов совпадают и являются более заполненными относительно нормального конфузора.

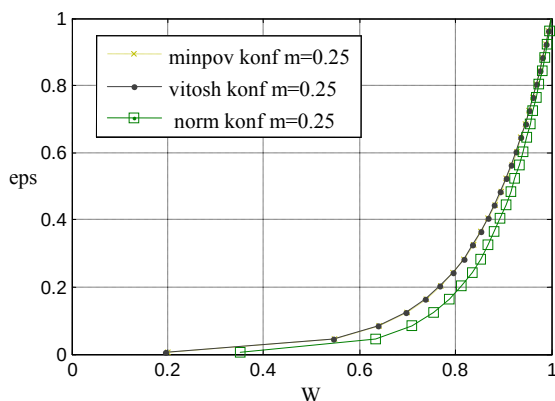


Рис. 4 - Профили скоростей в турбулентном пограничном слое

### Влияние профиля скоростей на коэффициент расхода конфузора

Заполненность профиля скоростей, напрямую влияет на величину коэффициента расхода, определяемую как отношение действительного расхода газа к его теоретическому значению. Расход среды может быть вычислен по выражению

$$G = \int_0^{r_0} 2\pi\rho\omega \, dr.$$

Поскольку для расчета теоретического значения расхода принимается допущение, что профиль скоростей прямоуголен и скорость потока во всех точках сечения канала равна скорости на оси  $\omega_0$ , можно записать, что коэффициент расхода равен

$$\alpha = \frac{G_d}{G_r} = \frac{\int_0^{r_0} 2\pi\rho\omega_x \, dr}{2\pi\rho\omega_0}.$$

Таким образом, получаем, что величина коэффициента расхода в выходном сечении конфузоров с профилем Витошинского и minpov будет имеет одинаковые значения и ближе к

единице, чем коэффициент расхода нормального конфузора. Действительно, расчеты показывают, что величина коэффициента расхода конфузоров minpov и Витошинского равна 0,9944, а нормального конфузора 0,9838.

### Выводы

В результате проведенных расчетов кинематических характеристик турбулентного течения и их сравнительного анализа для конфузоров трех типов, следует отметить, что в целом характеристики конфузоров minpov и Витошинского имеют более близкие друг к другу значения. Возрастание скорости в устройствах одного модуля происходит до весьма близких значений, однако интенсивность изменения скорости для разных конфузоров различна, и участки с наибольшим ускорением потока соответствуют участкам с наибольшими абсолютными значениями параметра продольного градиента давления. Профили скоростей на выходе конфузора minpov совпадает с профилем для сопла Витошинского и более заполнены, чем профиль скорости нормального конфузора, следствием чего является более высокое значение коэффициента расхода для первых двух типов конфузоров.

### Литература

1. ГОСТ 8.586.3-2005 - Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2007 – 33с.
2. 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
3. Решетняк В.В. Влияние формы сопла на параметры гидропушки // В. В. Решетняк, А. Н. Семко. Прикладна гідромеханіка. 2010. Том 12, N 3. С. 62 – 74
4. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Турбулентный пограничный слой сжимаемого газа // Новосибирск: Изд. СО АН СССР, 1962. – 180 с.
5. В.В.Кузьмин, С.А. Семичев Метод учета некоторых дестабилизирующих факторов на величину коэффициента расхода расходомерных сопел. Казань, изд-во КХТИ, 1981г -56с.