

УДК 533.697.3:001.891.57(045)

Кирчу Ф.И. к.т.н., доц., Пейман Мохаммади, Богданов Н.Ю., Али Джалали
Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЕ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ В ДИФFUЗОРНЫХ КАНАЛАХ

Kirchu F., Bogdanov N., Pejman Mohammadi, Ali Dzhali
National Aviation University, Kyiv, Ukraine (nikolaky@mail.ru)

VORTEX NUMERICAL MODELING AND BOUNDARY LAYER CONTROL IN DIFFUSER CHANNELS

В работе представлены результаты численного моделирования турбулентных течений в плоском симметричном диффузоре и диффузоре со средствами управления пограничным слоем. Исследуется влияние угла раскрытия диффузора на его аэродинамические характеристики. Также рассматривается влияние пассивных методов управления пограничным слоем, таких как, разделительные стенки и управляющие лопатки на аэродинамические характеристики диффузора. В работе ставится задача моделирования, с использованием методов численной газодинамики, течения в диффузоре канале с различными углами раскрытия при числах $M \leq 0,5$ с последующим сравнением расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: диффузорный канал; численное моделирование течения; аэродинамические отрывные течения; пассивные методы управления отрывными течениями

Введение

Расширительные каналы, которые используются для преобразования кинетической энергии потока в энергию давления, называются диффузорами [1-4]. Как правило, диффузоры проектируются прямоугольные (плоские), конические и кольцевые, также они могут выполняться с прямолинейными или криволинейными образующими. Известным остается тот факт, что для получения минимальных потерь полного давления, необходимо проектировать диффузорные каналы без отрыва потока.

Диффузорные каналы являются часто используемым элементом в проточных частях различных технических устройств. Одним из примеров является межлопаточный канал компрессорной решетки.

Технические требования к диффузорным каналам достигаются при безотрывном течении или при небольшом неустойчивом отрыве [5-7]. Одной из целей совершенствования диффузорного канала является увеличение степени расширения с параллельным использованием средств, улучшающих его характеристики. Главным средством такого улучшения является воздействие на отрыв пограничного слоя [8].

Диффузорные каналы должны иметь форму проточной части, обеспечивающую максимальную эффективность, то есть безотрывное течение в широком диапазоне скорости потока на входе, а также иметь равномерные поля распределения параметров потока на выходе.

Как известно, максимальная эффективность диффузора при одной и той же степени расширения может быть получена в канале с наименьшим значением угла раскрытия. В то же время, малый угол раскрытия приводит к увеличению длины канала, то есть к увеличению материалоемкости и веса конструкции. Отрыв потока - одна из основных и наиболее сложных проблем аэрогазодинамики. Развитие отрывных явлений в диффузорах имеет достаточно сложный характер в зависимости от типа диффузора: плоский прямолинейный или криволинейный, конический, кольцевой или осерадиальный и т.д. [9-13]. Картина отрыва потока даже в простейших плоских диффузорах с прямолинейными стенками имеет трехмерный характер и существенно отличается от классического отрыва внешних течений [14, 23]. Появление отрыва - приводит к резким изменениям давления, скорости и температуры потока, по сравнению с их значениями в условиях присоединенного течения. Рабочие характеристики гидромашин (насосов, турбин, вентиляторов, компрессоров) и их элементов (диффузоров, каналов, трубопроводов), а также летательных аппаратов и морских судов (самолетов, ракет, кораблей, подводных лодок и др.), непосредственно зависят от отрыва потока, поскольку их оптимальные значения достигаются в условиях близких к отрыву [5-7]. При возникновении отрыва требуется большая мощность для компенсации потерь энергии, а также могут развиваться вредные явления типа помпажа, срыва и т.п., которые приводят к разрушению конструкций. Управляя отрывом, можно избежать

разрушительного воздействия потока воздуха, связанного с отрывом и вихреобразованием.

Известно много работ, посвященных исследованию различных типов течений с присутствующим в них отрывом потока [15–18]. Отрыв потока и характеристики отрывных течений зависят от большого числа параметров. К таким параметрам относятся критерии подобия для течения газа, такие как, числа Рейнольдса Re , Маха M и т.д., а также факторы, учитывающие неравномерность скоростей, температур и давлений [15–18].

В работе ставится задача моделирования, с использованием методов численной газодинамики, течения в диффузорном канале с различными углами раскрытия при числах $M \leq 0,5$ с последующим сравнением расчетных и экспериментальных данных. В данной работе также рассматривается метод предотвращения срыва потока от стенок диффузоров с помощью разделительных стенок (рис. 2, рис. 3) и управляющих лопаток (рис. 4).

Цель

Оценка эффективности различных способов управления отрывными течениями в перерасширенных диффузорных каналах, методами численной газодинамики.

Постановка задачи

Основная задача расчета состоит в определении оптимальной формы диффузорного канала, обеспечивающей получение требуемых параметров и характеристик диффузора, при безотрывном течении и минимуме потерь энергии при заданных значениях режимных параметров (числах Re и M) и условий на входе, а также предотвращение отрыва с помощью разделительных стенок и управляющих лопаток [17-18].

В данной работе рассматривается течение в плоском диффузоре с прямолинейной образующей. На рис.1 изображена схема диффузора и показаны характерные геометрические параметры: α – угол раскрытия диффузора; h – высота входного сечения; H – высота выходного сечения; L – длина диффузора; Z – ширина диффузора.

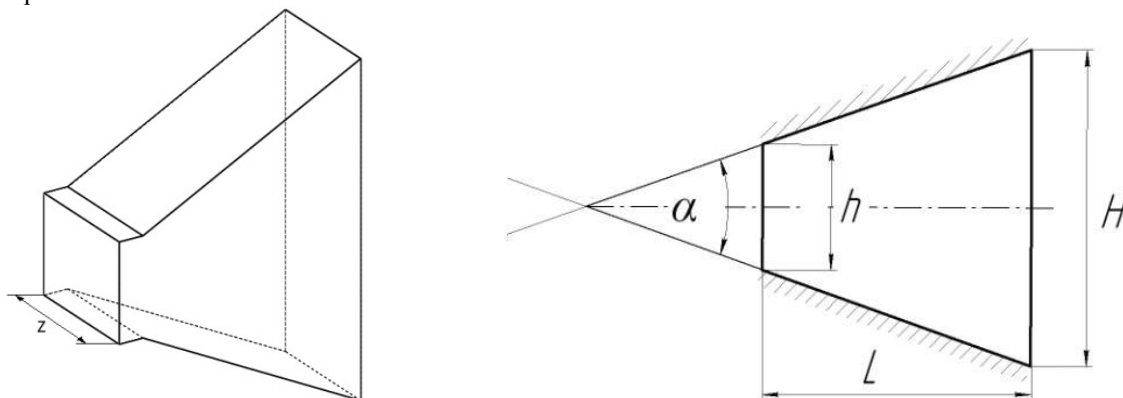


Рис.1. Схема плоского диффузора

Течение газа в диффузорном канале при докритических скоростях характеризуется положительными градиентами давлениями, при которых интенсивно изменяются параметры пограничного слоя и при определенных условиях имеет место отрыв потока [8].

Отрыв потока сопровождается резким изменением параметров потока и возникновением зоны, в которой рабочее тело в диффузорном канале движется против нарастающего давления. При определенных условиях, кинетической энергии в пограничном слое вблизи обтекания стенки не хватает для обеспечения течения против нарастающего давления. В этом случае, линии тока отходят от поверхности, и в образовавшейся области возникает возвратное течение - образуется устойчивая вихревая зона (срывная зона).

Положение точки отрыва определяется величиной градиента давления dp/dx и профилем скорости в пограничном слое. В точке отрыва $du/dy = 0$. Любое увеличение dp/dx при неизменном профиле скорости приводит к смещению точки отрыва против потока. С другой стороны, чем более полным будет профиль скорости, то есть чем большей энергией будут обладать частицы рабочего тела непосредственно у стенки при заданном градиенте давления dp/dx , тем позднее наступит срыв [8].

Объект исследований

В качестве объекта исследования был взят плоский диффузор со следующими геометрическими параметрами: $L=92$ мм, $h=40$ мм, угол открытия диффузора α изменялся от 6° до 40° с шагом 2° [17].

В данном диффузоре также были установлены разделительные стенки (рис. 2 и 3) и направляющие лопатки (рис. 4).

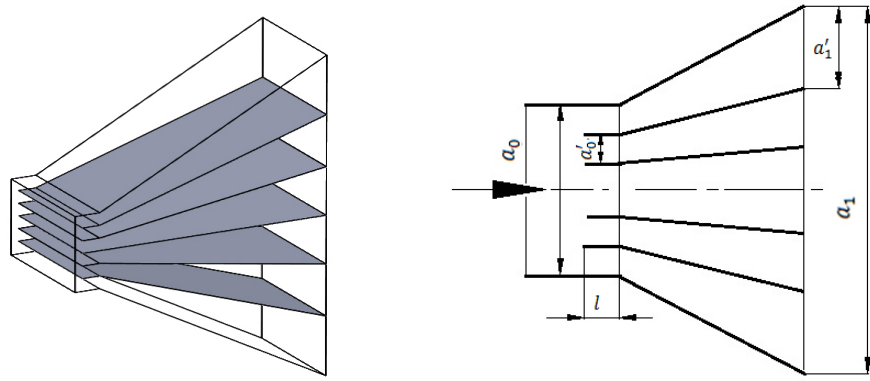


Рис.2. Разделительные стенки на всю длину диффузора

Таблица 1

Геометрические размеры диффузора с разделительными стенками на всю длину диффузора

α^0	a_0, mm	a'_0, mm	a'_1, mm	a_1, mm	k	L, mm	Z, mm
30	40	13,33	29,76	89,3	2	7	100
40	40	10	26,74	106,98	3	7	100
60	40	8	29,24	146,24	4	7	100
70	40	11,67	28,12	168,72	5	7	100

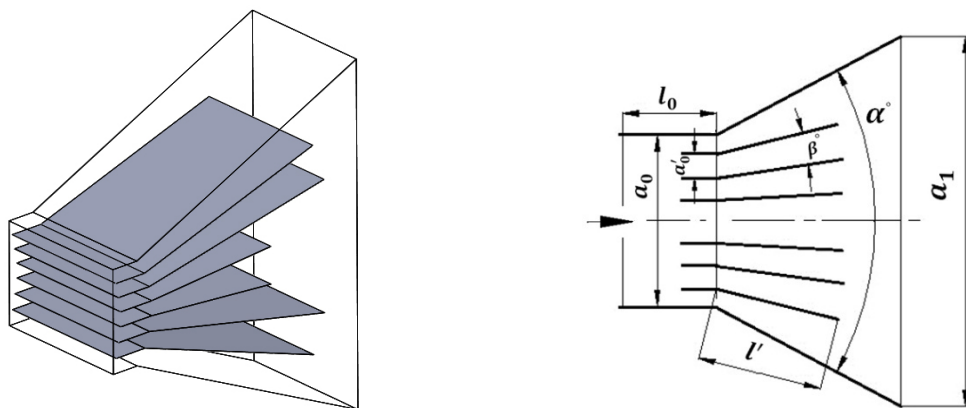


Рис.3. Разделительные стенки укороченной длины

Таблица 2

Геометрические размеры диффузора с разделительными стенками укороченной длины

α^0	a_0, mm	a'_0, mm	a_1, mm	l_0, mm	l', mm	k	β^0	Z, mm
30	40	10	89,3	10	75	3	7...8	100
40	40	8	106,97	10	50...75	4	7...8	100
60	40	5,7	146,23	10	50...75	6	5...8	100
70	40	5	168,84	10	60...80	8	8,75	100

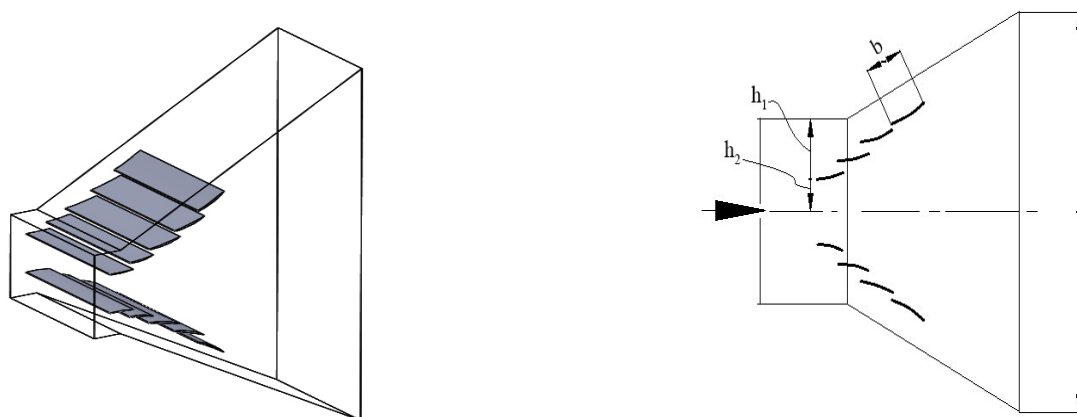


Рис.4. Направляющие лопатки

Таблица 3

Геометрические размеры диффузора с направляющими лопатками

α°	a_0, mm	l_0, mm	a_1, mm	h_1	h_2	b	k	Z, mm
30	40	10	89,3	10,5	9,5	9...12	3	100
40	40	10	106,97	10,5	9,5	9...12	3	100
60	40	10	146,23	10,5	9,5	9...12	4	100
70	40	10	168,84	10,5	9,5	9...12,5	5	100

Расчетная модель и модели турбулентной вязкости

С целью уменьшения зависимости результатов исследования от расчетной сетки, размер ячеек и форма сетки была одинаковой для всех моделей. Форма сеток чистого диффузорного канала и канала с управляющими лопатками представлена на рис. 5.

В данной работе расчетная модель построена в программе SolidWorks, затем, с помощью программы ICEM CFD, наносилась расчетная сетка. Максимальные размеры элементов сетки задавались от 0.1мм (возле стенки) до 3мм (в ядре канала), а минимальные размеры от 0.01мм (возле стенки) до 0.1мм (в ядре канала). Суммарное количество элементов расчетной сетки для простого диффузорного канала составляет 2 842 356, это же значение элементов для канала с разделительными стенками - в два раза больше.

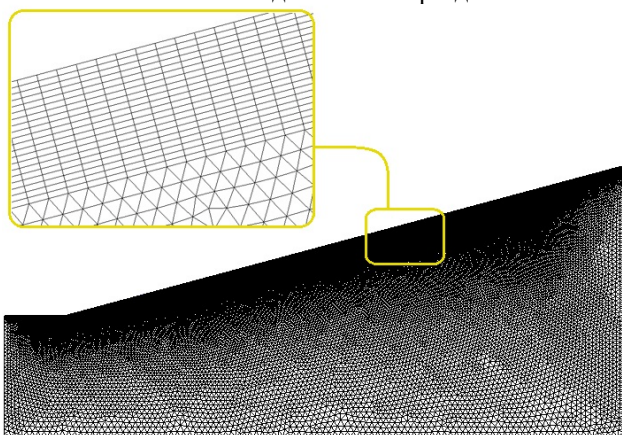


Рис. 5. Чистый диффузорный канал с призматическим слоем в пристеночной зоне

Моделирование течения проводилось с помощью модели турбулентной вязкости SST [19-20]. Данная модель создана Ментером в 1993 г., в этой модели совмещены лучшие качества модели $k-\omega$ и $k-\epsilon$ [21]. В формулах данных моделей добавлена функция F_1 , которая изменяется от 0 до 1. Где 1 граница пограничного слоя в основном потоке, и при приближении к стенкам эта величина уменьшается до нуля 0 – это полное прилипание потока к стенке.

Поскольку модели турбулентности типа $k-\epsilon$ лучше описывают свойства сдвиговых течений, а модели типа $k-\omega$ имеют преимущества при моделировании пристеночных функций, Ментер видоизменил стандартную связь между k , ϵ и турбулентной вязкостью μ_t [20]. В эту связь был введен специальный ограничитель (SST),

обеспечивающий переход от нее к формуле Брэдшоу, согласно которой турбулентное напряжение пропорционально кинетической энергии турбулентности. Этот прием, получивший название SST (shear stress transport), в дальнейшем широко применялся и в других моделях турбулентности с двумя уравнениями.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \gamma \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_{\beta \omega} \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; \quad (2)$$

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}; \tag{3}$$

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}. \tag{4}$$

Данная модель позволяет достаточно адекватно описывать как течение в ядре потока, так и в пограничном слое. Входная степень турбулентности принималась равной 5%.

Результаты расчетов и сравнение с экспериментом

Значение параметров как коэффициент полного давления ξ , коэффициент внутренних потерь ζ и коэффициент полезного действия η определяются по следующим формулам [22]:

$\xi = \frac{P_1^* - P_2^*}{0,5 \cdot \rho w_1^2}$; $\zeta = \frac{P_{01}}{P_{02}}$ и $\eta = \frac{C_P}{C_{P,ид}}$; где $C_P = \frac{P_2 - P_1}{0,5 \cdot \rho w_1^2}$ - коэффициент повышение давления; $C_{P,ид} = 1 - \frac{1}{(A_2/A_1)^2}$ - коэффициент идеального повышение давления; A_2/A_1 - отношение выходной площади к входной площади.
 Результаты расчета представлены на рис. 6-9 в виде зависимостей $\xi=f(\alpha)$, $\zeta=f(\alpha)$, $\eta=f(\alpha)$.

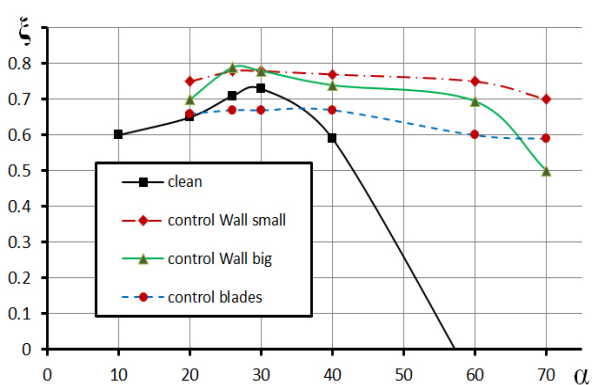


Рис. 6. Зависимость коэффициента восстановления давления от угла раскрытия диффузора

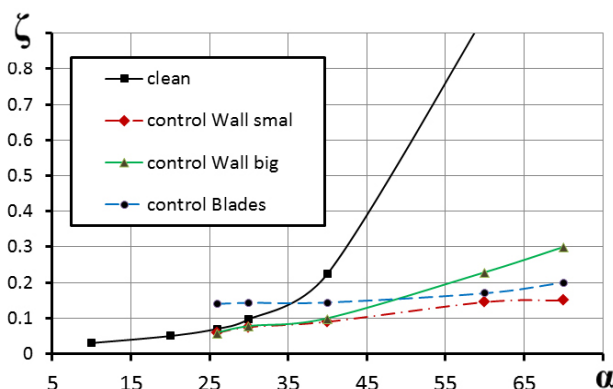


Рис. 7. Зависимость коэффициента потерь полного давления от угла раскрытия диффузора

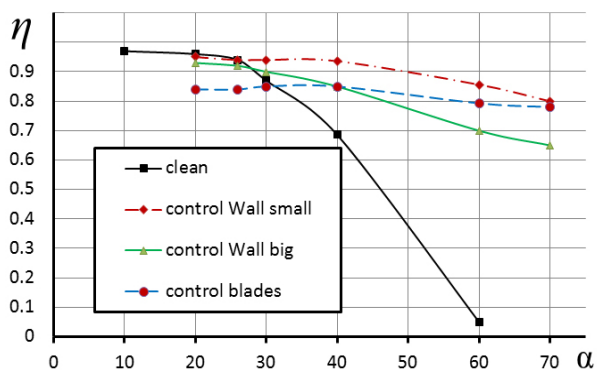


Рис. 8. Зависимость коэффициента полезного действия от угла раскрытия диффузора

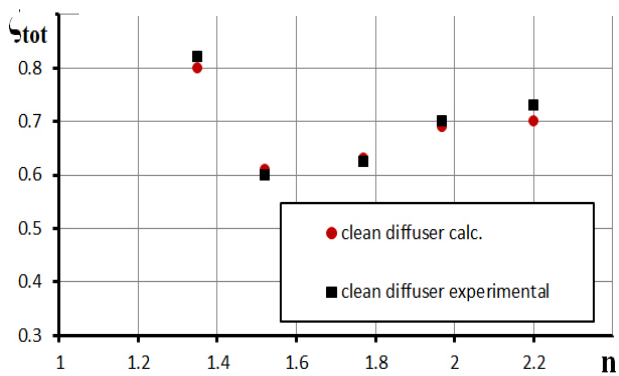


Рис. 9. Зависимость коэффициента потерь полного давления от степени расширения диффузора n

Как видно из рис.6, в чистом канале увеличение угла раскрытия канала, до тех пор пока поток не отрывался от стенок, приводит к увеличению коэффициента потерь полного давления (ζ). После отрыва потока и до угла раскрытия $\alpha \approx 55^\circ$ значение ξ уменьшается до нуля, а значение этого же параметра для каналов со средствами управления пограничного слоя находится в пределах от $0,5 \div 0,79$.

Из анализа рис. 8 видно, что нет необходимости применение управления пограничного слоя для углов раскрытия $\alpha \leq 26^\circ$. Также видно, что воздействие на пограничный слой, при критическом значении $\alpha \geq 40^\circ$ оказывает положительное влияние.

На рис.9 представлены некоторые результаты расчетов и экспериментальных данных [17]. Сопоставление

данных показывает хорошую сходимость результатов, расчеты от экспериментальных отклоняются в пределах $5\div 8\%$.

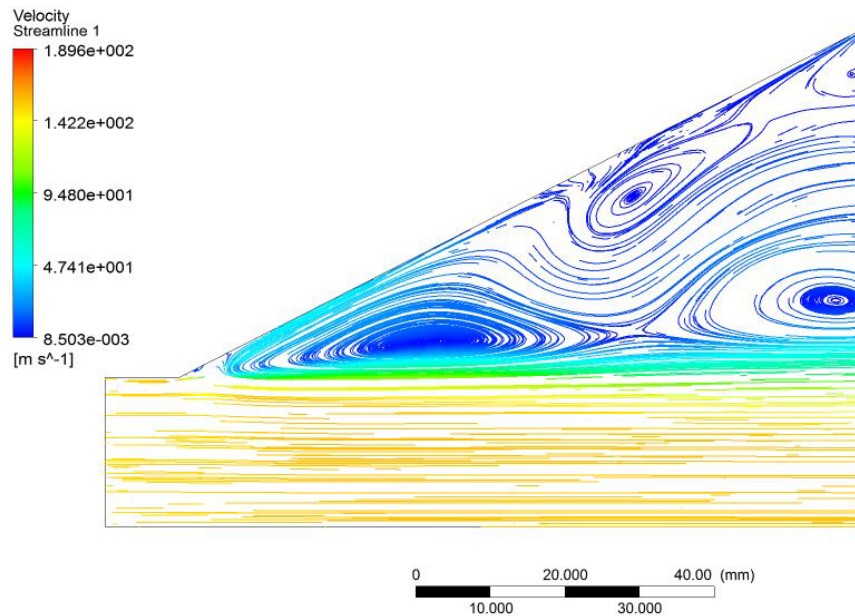


Рис. 10. Возникновение отрывного течения в простом диффузорном канале

На рис. 10 предоставлено простой диффузорный канал, в котором сделана визуализация потока с помощью векторной скорости. Крупномасштабные вихри свидетельствуют о том, что данный канал при таком угле раскрытия не работоспособен, и применение средств, для управления пограничным слоем считается необходимым.

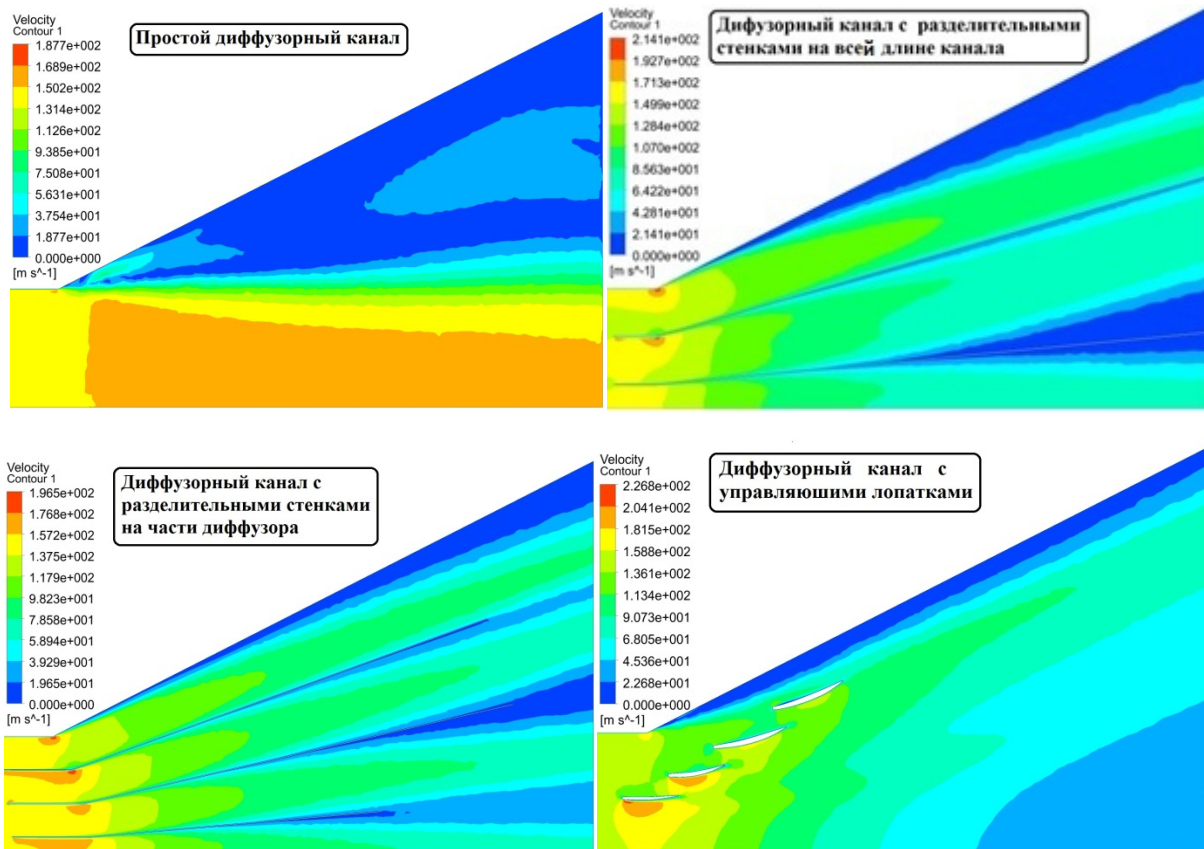


Рис. 11. Картины течения в разных исследуемых каналах

На рис.11 приведені результати розрахунків в формі контурних полів швидкостей в розрахунковій області для різних варіантів досліджуваних диффузорів.

Приведені результати розрахунків наочно демонструють зміну загальної картини течії в залежності від кута α при заданому числі Маха.

Аналіз розрахунків показує, що з ростом кута відкриття диффузора α , коефіцієнт відновлення тиску зменшується. Отриманий результат добре узгоджується з експериментальними даними [17]. Наявність відриву потоку, який є причиною утворення вихревих циркуляційних зон, супроводжується наявністю додаткових втрат енергії основного потоку та посиленням обміну кількості руху між шарами повітря, внаслідок чого змінюється кінематична структура потоку.

В результаті чисельного дослідження течії в плоскому осесиметричному диффузорі отримані залежності аеродинамічних коефіцієнтів від кута відкриття диффузора для $M=0,5$ і значеннях чисел $Re=5 \cdot 10^5 \div 9 \cdot 10^5$. Встановлено, що при $\alpha > 20^\circ$ виникає відрив потоку, супроводжується утворенням зворотного циркуляційного течії в формі вихрей. При збільшенні кута відкриття диффузора зростають втрати енергії, і зменшується КПД, точка відриву потоку зміщується і при $\alpha > 30^\circ$ поблизу стінки диффузора утворюється декілька відривних зон.

Висновки

Сопоставление результатов расчета с результатами экспериментальных данных [17] свидетельствуют о достаточно хорошей сходимости, что говорит о возможности использования данного метода расчета для дальнейшего исследования течения в диффузорах. Также следует отметить, что управление пограничным слоем позволяет повысить аэродинамическое качество диффузорных каналов, при этом коэффициент полезного действия и коэффициент восстановления давления увеличивается, а коэффициент внутренних потерь резко уменьшается.

Результаты исследования показывают возможность проектирования короткого диффузорного канала с большим углом раскрытия. Обеспечение нужного значения давления в коротком канале приводит к уменьшению массогабаритных характеристик всей системы, что для авиационного газотурбинного двигателя и авиационно-космической промышленности является важным вопросом.

Результаты исследования показали, что наиболее эффективным является канал с разделительными стенками укороченной длины, а наименее эффективным является канал с разделительными стенками на всю длину диффузора.

Анотація. В роботі представлені результати чисельного моделювання турбулентних течій в плоскому симетричному диффузорі та диффузорі із засобами керування прилежовим шаром. Досліджується вплив кута розкриття диффузора на його аеродинамічні характеристики. Також розглядається вплив пасивних методів керування прилежовим шаром, таких як, розподільчі стінки та лопатки керування на аеродинамічні характеристики диффузора. В роботі вирішується задача моделювання з використанням методів чисельної газодинаміки, течії в диффузорному каналі з різними кутами розкриття при числах $M \leq 0,5$ з послідовним порівнянням розрахункових та експериментальних даних.

Ключові слова: диффузорний канал; чисельне моделювання течії; аеродинамічні відривні течії; пасивні методи керування відривними течіями

Abstract. This paper presents the results of numerical simulation of turbulent flows in plane symmetric diffuser. Investigates the influence of an opening angle of the diffuser on the aerodynamic characteristics. Also examines the impact of passive methods of control of the boundary layer as the separation walls and the control vanes on the aerodynamic characteristics of the diffuser.

Purpose. The purpose of present investigation is modeling with the help of methods of numerical gas dynamic flow at diffuser with different opening angle numbers.

Design/methodology/approach. This article describes flows in plane symmetric diffuser. As the object of investigation was taking plane symmetric diffuser with several parameters: $L=92\text{mm}$, $h=40\text{mm}$, opening angle α changes from 6° to 40° with the step 2° . In presented diffuser also installed separation walls and control vanes. In this research the calculation models prepared in SolidWorks and after that with the help of ICEM CFD was generate calculating mesh. Maximum values of mesh elements stay from 0.1mm (near wall) to 3mm (in the hard of the flow) and minimum values from 0.01 (near wall) to 0.1mm (in the hard of the flow). The sum quantity of calculation mesh elements for simple diffuser channel are $2\ 842\ 356$, this values of elements for the channel with separation walls are writ double.

Findings. The results shows that most effective is the channel with short-cut length separation walls and the less effective is the channel with along the full length separation walls.

Keywords: diffuser canal; numerical flow modeling; aerodynamic separated flows; passive methods of separated flows control.

Библиографический список использованной литературы

1. Greitzer E. M. Coupled compressor diffuser flow in stability / E. M. Greitzer // Journal of aircraft. - 1977. - Vol. 14, № 3. - P. 233-238.
2. Герасименко В. П. Параметрический анализ характеристик кольцевого диффузора / В. П. Герасименко, Е. В. Осипов // *Авиационно-космическая техника и технология*. Научно-технический журнал. - Х. : ХАИ. - 2008. - № 6 (53). - С. 84-89.
3. Юдин А. Ю. Исследование осесимметричных диффузоров выхлопных патрубков турбомашин со специальным вдувом потока / А. Ю. Юдин // *Авиационно-космическая техника и технология*. Научно-технический журнал. - Х. : ХАИ. - 2011. - № 3 (80). - С. 80-84.
4. Русанов А. В. Аэродинамическое усовершенствование проточной части турбины ГТД на основе расчетов трехмерного вязкого течения. Часть 2. Переходной диффузор и ступень силовой турбины / А. В. Русанов, С. В. Ершов, Б. В. Исаков [и др.] // *Авиационно-космическая техника и технология*. Научно-технический журнал. - Х. : ХАИ. - 2004. - № 8 (16). - С. 46-50.
5. Биндер Я. И. Разработка и применение метода расчета рабочей характеристики прямолинейных прямоугольных диффузоров / Я. И. Биндер // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Энергетические машины и установки*. - 1983. - № 1. - С. 84-88.
6. Строн Р. К. Метод расчета плоских и осесимметричных диффузоров, основанный на определении запаса по отрыву / Р. К. Строн, С. Дж. Клайн // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Теоретические основы инженерных расчетов*. - 1983. - № 1. - С. 115-121.
7. Гоуз С. Расчет максимального восстановления давления в плоских диффузорах / С. Гоуз, С. Дж. Клайн // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Теоретические основы инженерных расчетов*. - 1978. - № 4. - С. 130-138.
8. Терещенко Ю. М. Численный расчет течения в плоском симметричном диффузоре / Ю. М. Терещенко, И. А. Ластивка, Л. Г. Волянская, Е. В. Дорошенко // *Энергосберегающие технологии и оборудование*. - 2011. - № 6. - С. 19-22.
9. Бардина Дж. Метод расчета течения в плоских диффузорах / Дж. Бардина, А. Лирио, С. Дж. Клайн, Дж. Х. Ферзигер, Дж. П. Джонстон // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Теоретические основы инженерных расчетов*. - 1981. - № 2. - С. 260-267.
10. Рено Л. Р. Характеристики и расчет плоских диффузоров с прямолинейной осью / Л. Р. Рено, Дж. П. Джонстон, С. Дж. Клайн // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Теоретические основы инженерных расчетов*. - 1967. - № 1. - С. 160-172.
11. Фокс Д. А. Режимы течения в криволинейных дозвуковых диффузорах / Д. А. Фокс, С. Дж. Клайн // *Техническая механика*. - 1962. - № 3. - С. 3-11.
12. Эжджажи Дж. Неустойчивый отрыв потока и максимальное восстановление давления в двумерных диффузорах с прямолинейными стенками / Дж. Энджаи, Дж. П. Джонстон // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Теоретические основы инженерных расчетов*. - 1980. - № 3. - С. 97-104.
13. Лохман Р. П. Закрученное течение в кольцевых диффузорах с коническими стенками / Р. П. Лохманн, С. Марковски, Е. Брукман // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Теоретические основы инженерных расчетов*. - 1979. - № 2. - С. 143-149.
14. Рено Л. Р. Метод определения характеристик плоских безотрывных диффузоров / Л. Р. Рено, Дж. П. Джонстон // *Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Теоретические основы инженерных расчетов*. - 1967. - № 3. - С. 216-230.
15. Чжен П. Управления отрывом потока / П. Чжен. - М. : Мир, 1979. - 365с.
16. Терещенко Ю. М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров / Ю. М. Терещенко. - М. : Машиностроение, 1987. - 168с.
17. Дейч М. Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин / М. Е. Дейч, А. Е. Зарянкин. - М. : Энергия, 1980. - 384 с.
18. Мигай В. К. Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин / В. К. Мигай, Э. И. Гудков. - Л. : Машиностроение, 1981. - 272 с.
19. Menter F. R. Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications / F. R. Menter // *AIAA Journal*. - 1994. - № 11. - P. 1299-1310.
20. Menter F. R. Zonal two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows / F. R. Menter // *A/AA 93-2906*. - 1993.
21. Юн А. А. Теория и практика моделирования турбулентных течений с теплообменом, смешением, химическими реакциями и двухфазных течений / А. А. Юн. - М., 2009. - 272 с.
22. Герасименко В. П. О полярах плоских диффузоров / В. П. Герасименко, А. С. Ткачук, А. А. Яцьшин // *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. - 2012. - С. 137-142.
23. Ульянов Л.М. Ламинарное течение и теплообмен в соосных конических каналах химико-технологического оборудования: дис. д-ра тех. наук: 06.12.2007 / Ульянов Леонид Михайлович; ХАИ. - Х., 2007. - 526 с.
- 24.

References

1. Greitzer E. M. Coupled compressor diffuser flow in stability. Journal of aircraft. 1977. Vol. 14, No.3. P. 233-238.
2. Gerasimenko V. P., Osipov E. V. Parametricheskij analiz harakteristik kol'cevogo diffuzora. Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. Nauchno-tekhnicheskij zhurnal. Kharkiv. HAI. 2008. No. 6 (53). p. 84-89.
3. Yudin A. Yu. Issledovanie osesimmetrichnyh diffuzorov vykhlopnyh patrubkov turbomashin so special'nyim vduvom potoka. Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. Nauchno-tekhnicheskij zhurnal. Kharkiv : HAI. 2011. No. 3 (80). p. 80-84.

4. *Rusanov A. V., Ershov S. V., Isakov B. V.* Aehrodinamicheskoe usovershenstvovanie protochnoj chasti turbiny GTD na osnove raschetov trekhmernogo vyzkogo techeniya. CHast' 2. Perekhodnoj diffuzor i stupen' silovoj turbiny. Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. Nauchno-tekhnicheskij zhurnal. Kharkiv: HAI. 2004. No.8 (16). p. 46-50.
5. *Binder Ya. I.* Razrabotka i primeneniye metoda rascheta rabochej harakteristiki pryamolinejnyh pryamougol'nyh diffuzorov. Tr. amerik. obshch. inzh.-mekh. Ser. EHnergeticheskije mashiny i ustanovki. 1983. No. 1. p. 84-88.
6. *Stron R. K., S. Dzh. Klajn.* Metod rascheta ploskih i osesimmetrichnyh diffuzorov, osnovannyj na opredelenii zapasa po otrывu Tr. amerik. obshch. inzh.-mekh. Ser. Teoreticheskie osnovy inzhenernyh raschetov. 1983. No. 1. p. 115-121.
7. *Gouz S., Klajn S. Dzh.* Raschet maksimal'nogo vosstanovleniya davleniya v ploskih diffuzorah. Tr. amerik. obshch. inzh.-mekh. Ser. Teoreticheskie osnovy inzhenernyh raschetov. 1978. No. 4. p. 130-138.
8. *Tereshchenko Yu. M., Lastivka I. A., Volyanskaya L. G., Doroshenko E. V.* Chislennyj raschet techeniya v ploskom simmetrichnom diffuzore. EHnergoberegayushchie tekhnologii i oborudovanie. 2011. No. 6. p. 19-22.
9. *Bardina Dzh., Lirio A., Klajn S. Dzh., Ferziger Dzh. H., Dzhonston Dzh. P.* Metod rascheta techeniya v ploskih diffuzorah. Tr. amerik. obshch. inzh.-mekh. Ser. Teoreticheskie osnovy inzhenernyh raschetov. 1981. No. 2. p. 260-267.
10. *Reno L. R., Dzhonston Dzh. P., Klajn S. Dzh.* Harakteristiki i raschet ploskih diffuzorov s pryamolinejnoy os'yu. Tr. amerik. obshch. inzh.-mekh. Ser. Teoreticheskie osnovy inzhenernyh raschetov. 1967. No. 1. p. 160-172.
11. *Foks D. A., Klajn S. Dzh.* Rezhimy techeniya v krivolinejnyh dozvukovyh diffuzorah. Tekhnicheskaya mekhanika. 1962. No. 3. p. 3-11.
12. *Ehzhdzhashi Dzh.* Neustojchivyy otrыв potoka i maksimal'noe vosstanovlenie davleniya v dvumernyh diffuzorah p pryamolinejnyimi stenkami. Tr. amerik. obshch. inzh.-mekh. Ser. Teoreticheskie osnovy inzhenernyh raschetov. 1980. No. 3. p. 97-104.
13. *Lohman R. P., Markovski S., Brukman E.* Zakruchennoe techenie v kol'cevyyh diffuzorah s konicheskimi stenkami. Tr. amerik. obshch. inzh.-mekh. Ser. Teoreticheskie osnovy inzhenernyh raschetov. 1979. No. 2. p. 143-149.
14. *Reno L. R., Dzhonston Dzh. P.* Metod opredeleniya harakteristik ploskih bezotryvnyh diffuzorov. Tr. amerik. obshch. inzh.-mekh. Ser. Teoreticheskie osnovy inzhenernyh raschetov. 1967. No. 3. p. 216-230.
15. *Chzhen P.* Upravleniya otrывom potoka. Moscow: Mir, 1979. 365p.
16. *Tereshchenko Yu. M.* Aehrodinamicheskoe sovershenstvovanie lopatochnyh apparatov kompressorov. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 168p.
17. *Dejch M. E., Zaryankin A. E.* Gazodinamika diffuzorov i vyhlopnyh patrubkov turbomashin. Moscow: EHnergiya, 1980. 384 p.
18. *Migaj V. K., Gudkov EH. I.* Proektirovanie i raschet vyhodnyh diffuzorov turbomashin. Leningrad: Mashinostroenie, 1981. 272 p.
19. *Menter F. R.* Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal. 1994. No. 11. - P. 1299-1310.
20. *Menter F. R.* Zonal two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows. A/AA 93-2906. 1993.
21. *Yun A. A.* Teoriya i praktika modelirovaniya turbulentnyh techenij s teploobmenom, smesheniyem, himicheskimi reakcijami i dvuhfaznyh techenij. Moscow. 2009. 272 p.
22. *Gerasimenko V. P., Tkachuk A. S., Yacyshin A. A.* O polyarah ploskih diffuzorov. Energetichni ta teplotekhnichni procesi j ustatkuvannya. 2012. p. 137-142.
23. *Ul'ev L.M.* Laminarnoe techenie i teploobmen v soosnyh konicheskikh kanalah himiko-tekhnologicheskogo oborudovaniya: dis. d-ra teh. nauk: 06.12.2007. Ul'ev Leonid Mihajlovich; Kharkiv. HAI, 2007. 526 p.

Подана до редакції 09.03.2015