

УДК 621.452.3.(076.5)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ОТРЫВОМ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ДИФFUЗОРНЫХ КАНАЛАХ ПРИ ПОМОЩИ ВИХРЕВЫХ ЯЧЕЕК**

© 2007 С. А. Смирнов, С. В. Веретенников

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П. А. Соловьева

В статье рассмотрены проблемы управления отрывом пограничного слоя в диффузорных каналах при помощи вихревых ячеек, а также представлены результаты исследований их работы.

Одно из актуальных направлений современной аэрогидромеханики связано с организацией управления потоками, в том числе при обтекании тел различной геометрии. Наряду с известными пассивными и активными способами управления пристеночными течениями заслуживает внимания способ активного управления с помощью так называемых вихревых ячеек (ВЯ), представляющих собой поперечные профилированные вырезы, расположенные на поверхности обтекаемого тела. Этот способ управления имеет широкие возможности практической реализации и позволяет изменять характер обтекания тела путем мелкомасштабного активизационного воздействия. При обтекании тела с ВЯ формируется область с замкнутыми линиями тока. За счет действия ВЯ на поверхности тела образуется эффективный профиль, форма которого близка к форме исходного профиля без ВЯ. При учете вязкости жидкости разница обтекания тела с ВЯ или без нее оказывается существенной, так как на разделяющей линии тока, в отличие от твердой поверхности крылового профиля, скорость течения не равна нулю. Для наружного обтекания разделяющая линия тока может рассматриваться как поверхность профиля с движущейся стенкой и потому трение о такую стенку меньше, следовательно, и вероятность возникновения отрыва уменьшается. На сегодняшний день существует тенденция к уменьшению числа ступеней компрессора при сохранении расчетной степени повышения давления воздуха. Для получения требуемой степени повышения давления при наименьшем числе ступеней компрессора

необходимо, чтобы осевая составляющая скорости была велика. Во многих авиационных двигателях скорость воздуха на выходе из компрессора достигает 150 м/с. Осуществлять процесс сжигания топлива в потоке воздуха с такой скоростью нецелесообразно ввиду не только больших трудностей в организации процесса горения, но и чрезмерно больших потерь полного давления. Поэтому до начала процесса горения величину скорости потока воздуха существенно уменьшают, для чего между компрессором и камерой сгорания обычно устанавливают диффузор. В диффузоре происходит торможение потока, а уменьшение скорости сопровождается повышением статического давления. Эффективность процесса преобразования энергии потока в диффузоре имеет большое значение, поскольку любые потери приводят к уменьшению полного давления. Потери в диффузоре обусловлены различными факторами: трением газа о стенки, вихреобразованием и отрывом пограничного слоя. Отрыв пограничного слоя является одним из главных ограничивающих факторов при проектировании самых различных аэродинамических объектов с диффузорными участками. Необходимым условием отрыва потока от стенки является возрастание давления в направлении течения, т.е. наличие градиента давления в направлении течения. В общем случае отрыв потока происходит под действием положительного градиента давления и под влиянием ламинарных или турбулентных вязких явлений. В отсутствие одного из этих факторов поток не отрывается. Значения угла раскрытия диффузора для безотрывного проте-

кания процесса по данным [2] находится в диапазоне  $7^\circ \leq a \leq 12^\circ$ . В авиационных двигателях, где осевые габариты и масса должны быть по возможности минимальны, желательна угол раскрытия диффузора принимать максимально допустимым, выбирая оптимальную конструкцию диффузора на основе технико-экономического компромисса между длиной и потерями давления. Если подходить к проблеме с позиций конструктора, то оптимальным будет диффузор, обеспечивающий требуемое снижение скорости на минимальной длине при минимуме потерь полного давления, равномерных полях параметров и устойчивом течении на выходе из диффузора. При помощи вихревых ячеек можно значительно уменьшить связанные с трением турбулентные вязкие напряжения и, тем самым, свести к минимуму вероятность отрыва пограничного слоя. По своей сути ВЯ является генератором устойчивого микровихря. Управления течением в плавном диффузоре при помощи вихревых ячеек позволит увеличить угол его раскрытия, сократив тем самым длину, и сохранить величину потерь на требуемом уровне. При выборе положения ВЯ на стенке обтекаемого профиля необходимо различать два эффекта, приводящих к предотвращению отрыва. Первый, основной, эффект – замена твердой стенки разделяющей линией тока. Для этого ВЯ должна располагаться на участке поверхности профиля, вдоль которого давление возрастает в направлении течения. Вторым эффектом заключается в изменении профиля скорости в пограничном слое при прохождении им ВЯ. Непосредственно за ВЯ профиль скорости более наполнен, чем при ее отсутствии. И поток за ячейкой может преодолеть без отрыва больший неблагоприятный градиент давления, не отрываясь от стенок. Для использования этого эффекта ячейку нужно размещать несколько выше по потоку от места предполагаемого отрыва, причем ячеек может быть несколько.

Для экспериментального исследования в качестве модели используется плавный диффузорный канал прямоугольного поперечного сечения с углом раскрытия  $a = 20^\circ$  и  $a = 40^\circ$ , высотой входного сечения  $h = 0,027$  м.

Основной задачей исследования являлось определение влияния вихревой ячейки на отрыв пограничного слоя путем аэродинамических и визуализационных испытаний. Для характеристики эффективности диффузора использовались [1]: коэффициент восстановления статического давления  $C_p$  (1) и коэффициент гидравлических потерь  $x$  (2), соответственно равные

$$C_p = \frac{P_{\text{вых}} - P_{\text{вх}}}{\rho \cdot V_{\text{вх}}^2 / 2}; \quad (1)$$

$$x = \frac{P_{\text{вх}}^* - P_{\text{вых}}^*}{\rho \cdot V_{\text{вх}}^2 / 2}. \quad (2)$$

Аэродинамические исследования проводились с целью определения полей скоростей на входе и выходе из диффузорного канала. В эксперименте измерялись поля полного давления на входе в диффузор и на выходе. Измерения производились при помощи гребенок полного давления. Число Рейнольдса, подсчитанное по высоте входного отверстия и среднерасходной скорости на входе в преддиффузор, составляло порядка  $1,1 \cdot 10^5$ . Результаты измерений представлены на рис. 1.

Рассчитанные значения коэффициентов восстановления статического давления и коэффициентов гидравлических потерь приведены в табл. 1.

В каналах с вихревой ячейкой при угле раскрытия  $a = 20^\circ$  профиль скорости на выходе становится более полным и заметно выравнивается в пристеночной области. При  $a = 40^\circ$  профиль скорости становится неравномерным, наблюдаются значительные колебания показаний манометров, в некоторых близких к ВЯ областях это говорит о наличии развитой турбулентности, что вероятно связано с отрывом пограничного слоя.

Визуализационные исследования модели плавного диффузора высотой входного сечения  $H = 0,027$  м проводились с целью определения местоположения отрыва пограничного слоя. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

Для определения местоположения отрыва пограничного слоя в протекающую по

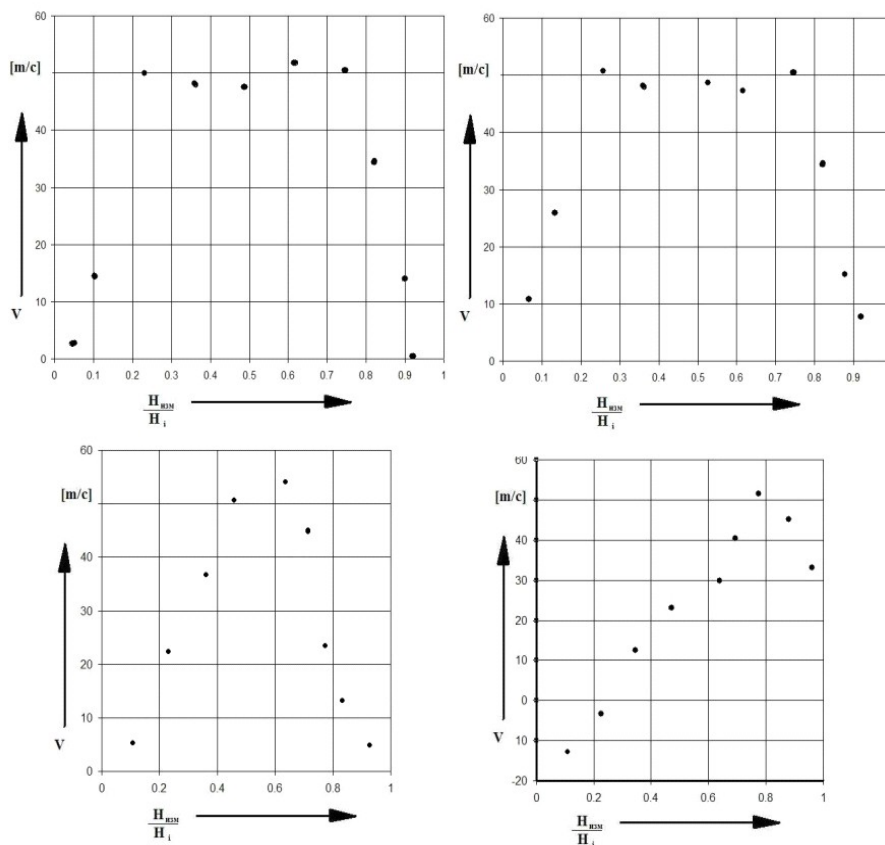


Рис. 1. Профили скорости

каналу воду ( $Re = 1,1 \cdot 10^5$ ;  $v = 4$  м/с) вводилась подкрашенная жидкость, что позволило определить размеры зоны отрывного течения и ее положение. Визуализационные испытания были проведены для углов раскрытия 10, 20, 40, 60 и 80 градусов. При различных углах раскрытия наблюдалось чередование нескольких режимов течения уже описанных в [1, 3]:

1) Безотрывное течение при малых углах раскрытия ( $\alpha = 10^\circ$ ).

2) Трехмерный отрыв переходного типа. Образуется большая переходная область, в которой положение, размеры и интенсивность отрыва изменяются во времени. При

этом режиме наблюдаются сильные пульсации течения ( $\alpha = 20^\circ$ ).

3) Установившееся двумерное течение. Существует область полностью развитого отрыва, имеющая треугольную форму и образованная в основном турбулентным возвратно-циркуляционным течением от выходного сечения диффузора почти до его горла. Непрерывный основной поток относительно спокойно движется около другой стенки ( $\alpha = 40^\circ$ ).

4) Отрыв потока от обеих стенок. Образуется струйное течение, при котором основной поток отрывается от обеих стенок

Таблица 1. Значения коэффициентов восстановления статического давления и коэффициентов гидравлических потерь

	без ВЯ		с ВЯ	
	$C_p$	$\zeta$	$C_p$	$\zeta$
$\alpha = 20^\circ$	0,28	0,26	0,287	0,25
$\alpha = 40^\circ$	0,25	0,27	0,22	0,31

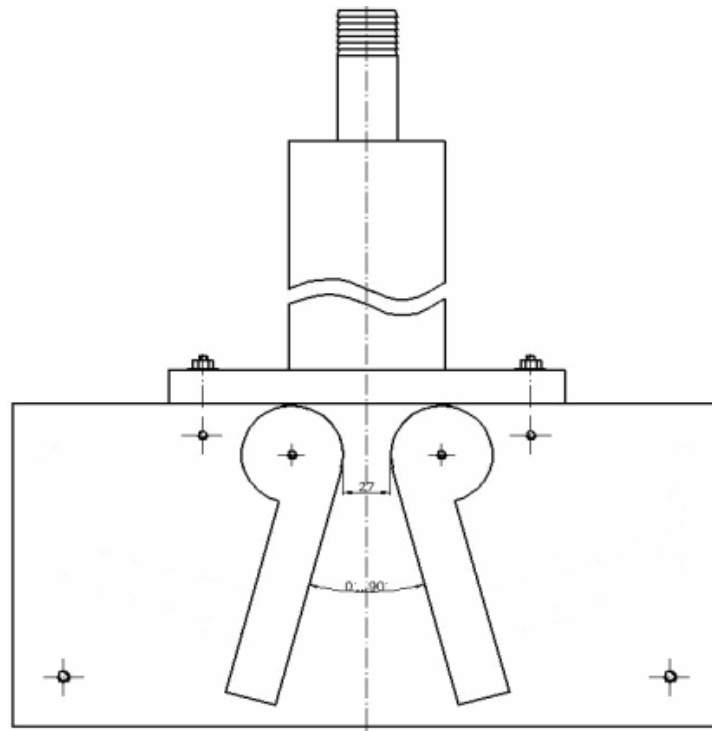


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

сразу после критического сечения и больше не присоединяется к стенкам ниже по потоку. Такой режим течения существует только при больших углах раскрытия диффузора ( $\alpha = 80^\circ$ ).

Следующая часть эксперимента заключалась в определении наличия влияния вихревых ячеек на отрыв пограничного слоя.

Схема расположения ВЯ на стенке диффузорного канала показана на рисунке.

Из рис. 3 видно, что вихревая ячейка уменьшает отрыв пограничного слоя и течение при угле раскрытия диффузора ( $\alpha = 20^\circ$ ) становится безотрывным. Безотрывное течение возникает за счет активизационных воздействий ВЯ: замена твердой стенки поверх-



Рис. 3. Безотрывное течение ( $\alpha = 20^\circ$ )



Рис. 4. Визуализация течения с ВЯ ( $\alpha = 40^\circ$ )

ностью тока и изменения профиля скорости в пограничном слое.

При угле раскрытия  $\alpha = 40^\circ$  (рис. 4) воздействия ВЯ становится недостаточно, чтобы удержать поток около стенки, образуется область полностью развитого отрыва, образованная турбулентным возвратно-циркуляционным течением от выходного сечения диффузора до ВЯ. Т.е. при больших углах раскрытия диффузора ВЯ данной геометрии и расположения оказывает турбулизирующее влияние на поток.

Для получения дополнительных сведений о структуре потока выполнено численное моделирование течения в исследуемой модели при углах раскрытия диффузора 20 и 40 градусов. При расчете использовалась 2D-структурированная сетка с общим числом элементов 200 000. На стенках задавалось сгущение, соответствовавшее  $y^+=1$ . Расчет выполнен в двухмерной осесимметричной постановке. На входе задавалось полное давление, на выходах – статическое, соответствовавшее эксперименту. Система уравнений RANS замыкалась  $k-\omega$  SST моделью турбулентности. Параметры турбулентности на входе: интенсивность 5 %, относительная турбулентная вязкость 10. Результаты расчетов представлены на рис. 5.

Результаты численного моделирования хорошо согласовались с данными, полученными при визуализационных испытаниях. Можно сделать вывод о том, что ВЯ оказывает воздействие на течение в диффузорном канале: при устраняет отрыв пограничного слоя, при интенсивность турбулентности значительно возрастает, в результате чего зона отрыва пограничного слоя сдвигается в сторону входного участка и располагается непосредственно за ВЯ.

В результате проведенных исследований было установлено, что ВЯ, расположенная вблизи места отрыва пограничного слоя в плавных диффузорных каналах, оказывает положительное влияние на течение (то есть устраняет отрыв пограничного слоя) при углах раскрытия, находящихся в диапазоне  $10^\circ < \alpha < 20^\circ$ .

#### Список литературы

1. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания газотурбинных двигателей. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
2. М. Е. Дейч, А. Е. Зарянкин. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин. – М.: Энергия, 1970. – 384 с.
3. Чжен П. Отрывные течения. – М.: Мир, 1973. Т.1. - 300 с.
4. Чжен П. Отрывные течения. – М.: Мир, 1973. Т.3. - 334 с.

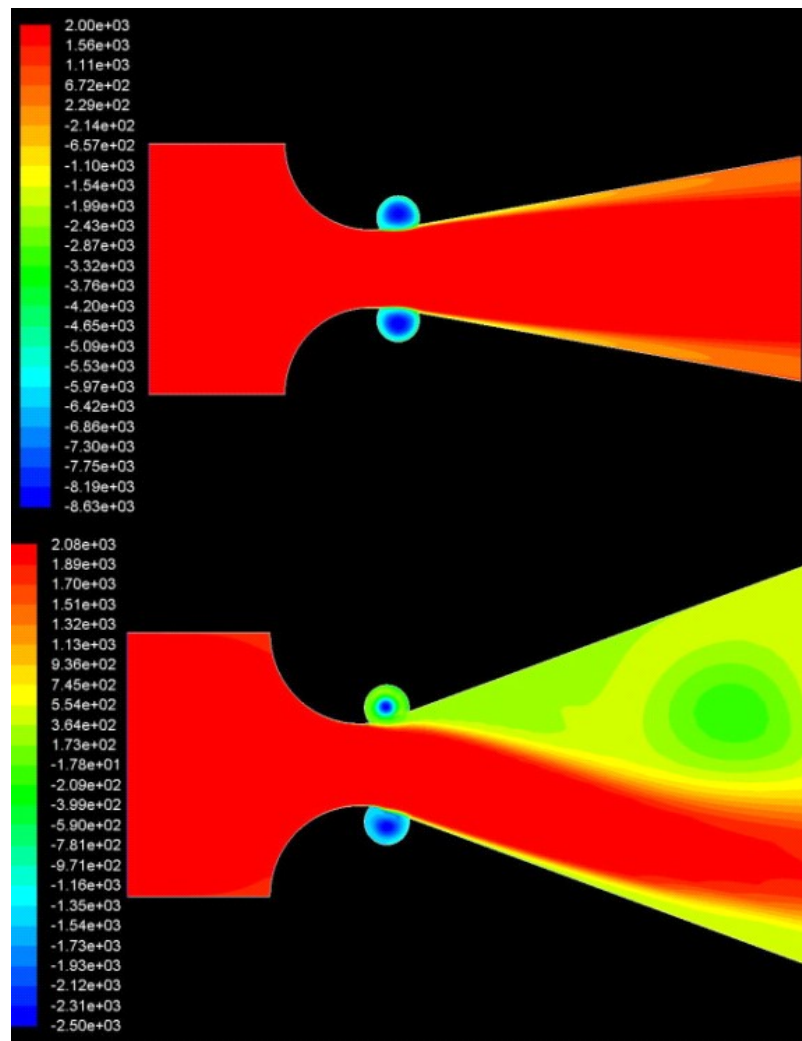


Рис. 5. Распределение полного давления ( $\alpha = 20^\circ, 40^\circ$ )

## BOUNDARY LAYER SEPARATION INVESTIGATION IN DIFFUSION CHANNELS WITH SWIRLING CELLS

© 2007 S. A. Smirnov, S. V. Veretennikov

Rybinsk state aviation academy named by Solovieva P. A.

This article deals with boundary layer separation problems in diffusion channels with swirling cells and it is also shown investigation results.