

УДК 629.7.035.03-036.34

У роботі приведено результати дослідження впливу турбулізаторів на інтенсивність процесу перемішування у примежовому шарі у дифузорному каналі, з метою оцінки впливу турбулізаторів на ідеальний процес перемішування, шляхом чисельного моделювання течії з наступним порівнянням результатів чисельного і фізичного експерименту

**Ключові слова:** дифузорний канал, турбулізатор, примежовий шар

В работе приведены результаты исследования влияния турбулизаторов на интенсивность процесса перемешивания в пограничном слое в диффузорном канале, с целью оценки влияния турбулизаторов на идеальный процесс перемешивания, путем численного моделирования течения с последующим сравнением результатов численного и физического эксперимента

**Ключевые слова:** диффузорный канал, турбулизатор, пограничный слой

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ДИФFUЗОРНОМ КАНАЛЕ С ТУРБУЛИЗАТОРАМИ

**Ю. М. Терещенко**

Доктор технических наук, профессор\*

**Е. В. Дорошенко**

Кандидат технических наук, доцент\*

**Л. Г. Волянская**

Кандидат технических наук, профессор\*

\*Кафедра авиационных двигателей

Национальный авиационный университет

пр-т Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03680

## 1. Введение

Отрыв потока – одно из наиболее сложных явлений, сопровождающих течение в компрессоре. Появление отрыва приводит к резким изменениям параметров потока и требует больших затрат энергии для компенсации потерь энергии. При отрыве потока могут развиваться такие опасные явления как потеря газодинамической устойчивости, помпаж.

Известно много работ, посвященных исследованию различных типов течений с присутствующим в них отрывом потока [1 – 2]. Как известно, отрыва потока можно избежать, применяя различные виды воздействия на поток [1 – 9]. Одним из таких методов является принудительная турбулизация потока.

Принудительная турбулизация потока в каналах турбомашин позволяет интенсифицировать энергообмен как внутри пограничного слоя, так и между пограничным слоем и основным потоком, с целью повышения устойчивости к отрыву пограничного слоя (повышения эффективности работы турбомашин).

Для создания турбулизации потока в каналах формируют выступы или устанавливают турбулизаторы (генераторы вихрей) различных геометрических форм. Турбулизатор образует вихри, которые взаимодействуют с пограничным слоем, обтекающей поверхностью, смешивая пограничный слой с внешним потоком, который обладает большей энергией. Таким образом, уменьшается толщина и повышается энергия пограничного слоя, что позволяет задержать, контролировать, а иногда и предотвратить срыв пограничного слоя с поверхности.

## 2. Постановка задачи

В данной работе ставится задача расчетного исследования влияния турбулизаторов на интенсивность

процесса перемешивания в пограничном слое на стенках диффузорного канала, с целью оценки влияния турбулизаторов на процесс перемешивания, путем численного моделирования течения с последующим сравнением результатов численного и физического эксперимента.

## 3. Решение задачи и анализ результатов

Расчет турбулентного течения газа выполняется путем численного решения осредненных уравнений Навье – Стокса (уравнения Рейнольдса). Для замыкания уравнений Навье – Стокса служат модели турбулентной вязкости. В данной работе для расчета использовалась модель турбулентной вязкости SST Ментера [10], которая записывается путем суперпозиции моделей  $k-\epsilon$  и  $k-\omega$  и основывается на том, что модели типа  $k-\epsilon$  лучше описывают свойства свободных сдвиговых течений, а модели  $k-\omega$  имеют преимущество при моделировании пристеночных течений.

Для исследования характера обтекания было смоделировано течение в диффузорном канале, который имел следующие размеры: длину  $L=400$  мм, ширину  $d=65$  мм, высоту на входе  $h=150$  мм и высоту на выходе  $h=250$  мм (рис. 1, а, б).

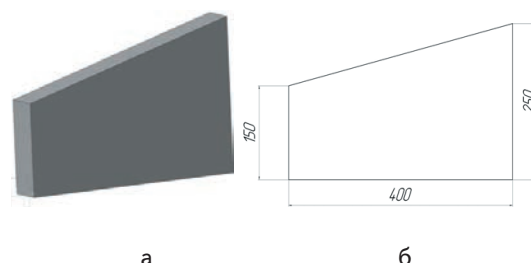


Рис. 1. Схема диффузорного канала: а – 3D модель диффузорного канала; б – схема диффузорного канала

Расчет проводился для числа Рейнольдса  $Re=0,5 \cdot 10^5$  и  $M=0,4$ . Планирование эксперимента предусматривало исследование влияния турбулизаторов на параметры пограничного слоя при различных значениях высоты турбулизаторов  $k$  от 0,18 до 0,9 мм. Расстояние между турбулизаторами (по потоку) составляло  $\Delta x=15$  мм, а между соседними турбулизаторами (поперек потока)  $\Delta z=10$  мм. Для эксперимента было выбрано три варианта размещения турбулизаторов (на входе, в середине и на выходе).

Для проведения расчетов была построена нерегулярная адаптивная сетка с  $\approx 1,3$  млн. ячеек.

В качестве рабочего тела использовался воздух при нормальных атмосферных условиях.

На рис. 2 показано мгновенное поле скорости в диффузорном канале без турбулизаторов, а также виден отрыв потока с верхней стенки диффузорного канала и образование вихревого течения.

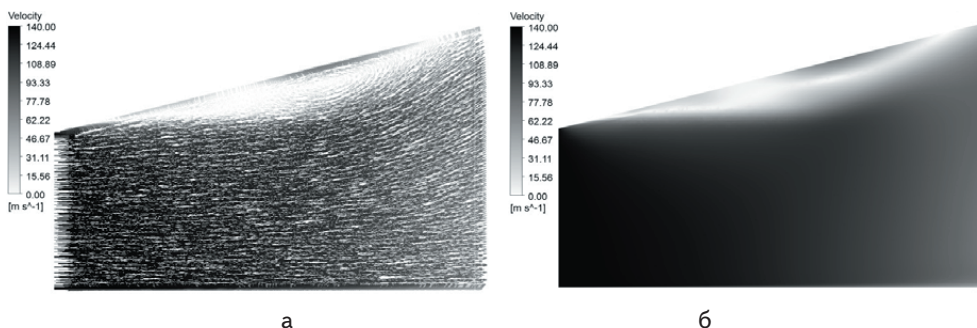


Рис. 2. Мгновенное поле скорости в диффузорном канале: а – векторное поле скорости; б – скалярное поле скорости

Установка турбулизаторов интенсифицирует энергию в пограничном слое, изменяя характер течения в диффузорном канале. На рис. 3 можно увидеть качественное изменение обтекания – смещение и уменьшение вихревого течения на верхней стенке диффузорного канала.

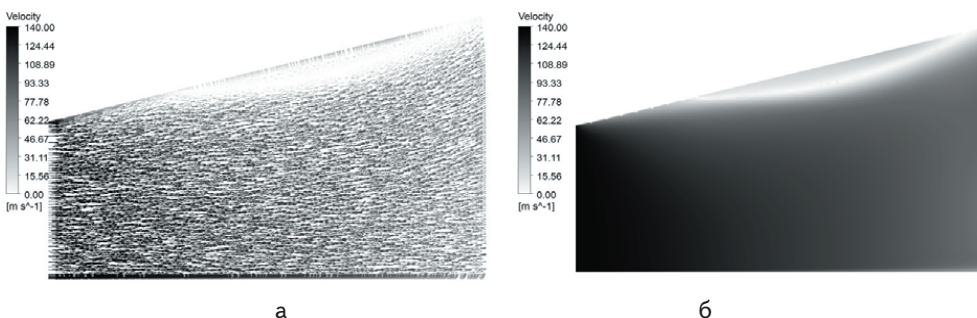


Рис. 3. Мгновенное поле скорости в диффузорном канале (турбулизаторы ( $k=0,9$  мм) установлены во входной части канала): а – векторное поле скорости; б – скалярное поле скорости

Однако установка турбулизаторов в средней части диффузорного канала за точкой отрыва уже не дает такого эффекта (рис. 4, а, б). В данном случае, в зоне, где установлены турбулизаторы, образуется обратное течение. В данном случае установка турбулизаторов не является эффективной.

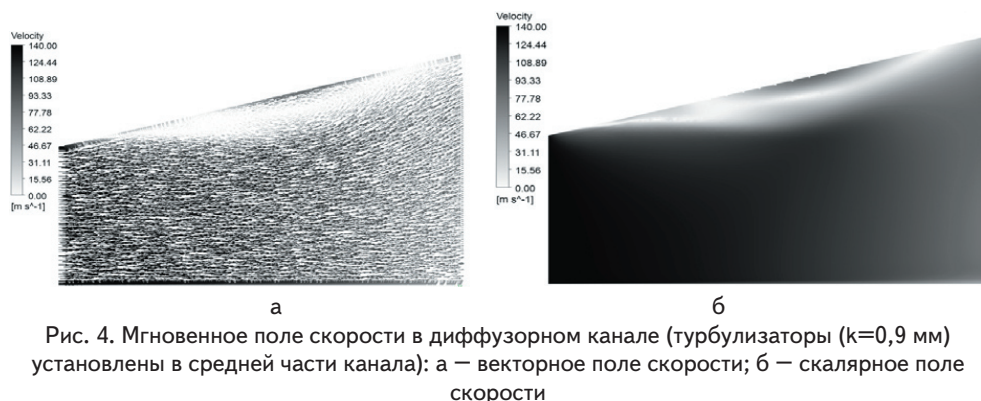


Рис. 4. Мгновенное поле скорости в диффузорном канале (турбулизаторы ( $k=0,9$  мм) установлены в средней части канала): а – векторное поле скорости; б – скалярное поле скорости

Для количественной оценки влияния турбулизаторов на интенсивность перемешивания в пограничном слое по результатам численного моделирования строился профиль скорости и определялась толщина пограничного слоя. После этого рассчитывались интегральные характеристики пограничного слоя [2].

На рис. 5 представлена зависимость относительной толщины вытеснения пограничного слоя  $\bar{\delta}^* = \frac{\delta^*}{k}$  в выходном сечении диффузорного канала от уровня шероховатости (1, 2, 3 – варианты расположения турбулизаторов в канале во входном участке, в середине и на выходном участке канала, соответственно) от уровня шероховатости  $\bar{k} = \frac{k}{L}$ . Линиями показаны данные численного эксперимента, точками – результаты физического эксперимента [1].

Применение турбулизаторов в диффузорном канале приводит к затягиванию срыва потока с поверхности. Изменение толщины вытеснения пограничного слоя в выходном сечении диффузорного канала зависит от многих факторов, в том числе, размещения турбулизаторов и их геометрических размеров. Как показали результаты расчетов, наиболее эффективным было переднее располо-

жение турбулизаторов при высоте  $k=0,18...0,9$  мм. При высоте шероховатости больше критического наблюдается увеличение толщины пограничного слоя.

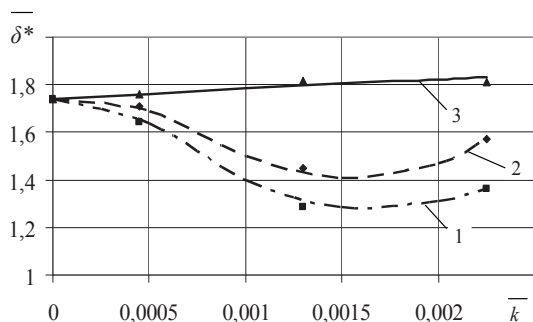


Рис. 5. Зависимость толщины вытеснения пограничного слоя в выходном сечении диффузорного канала  $\delta^*$  от уровня шероховатости поверхности  $\bar{k}$

#### 4. Выводы

1. Сопоставление результатов физического и численного эксперимента показали их хорошую сходимость. Таким образом, можно сделать вывод, что моделирование течения вязкого газа в диффузорном канале с использованием численного решения осредненных уравнений Навье – Стокса, замыкающихся моделью турбулентной вязкости SST, является достаточно надежным и может быть рекомендовано для дальнейших исследований течения в диффузорных каналах с турбулизаторами.

2. Как показали результаты численного эксперимента, на параметры пограничного слоя существенное влияние оказывает относительная высота турбулизаторов, их расположение на обтекаемой поверхности и степень диффузорности канала.

3. Расположение турбулизаторов во входной части диффузорного канала приводит к затягиванию срыва и уменьшению потерь, связанных со срывом потока.

#### Литература

1. Терещенко, Ю.М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров [Текст] / Ю.М. Терещенко – М.: Машиностроение, 1987. – 168с.
2. Чжен, П. Управление отрывом потока [Текст] : пер. с англ. / П. Чжен. – М.: Мир, 1979. – 365с.
3. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] : пер. с англ. / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 713с.
4. Lin, J. C. Review of research on low-profile vortex generators to control boundary layer separation [Текст] / J. C. Lin // Progress in Aerospace Sciences. – 2002. – № 38. – P. 389-420.
5. Shan, H. Numerical study of passive and active flow separation control over a NACA0012 airfoil [Текст] / H. Shan, L. Jiang, C. Liu, et al. // Computers & Fluids. – 2008. – №37(8). – P. 975-992.
6. Godard, G. Control of a decelerating boundary layer. Part 1: optimization of passive vortex generators [Текст] / G. Godard, M.Stanislas // Aerospace Science and Technology. – 2006. – №10(3). – P.181-191.
7. Ahmad, K.A. Sub-boundary layer vortex generator control of a separated diffuser flow [Текст] / K.A. Ahmad, J.K. Watterson, J.S. Cole, et al. // 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. – 2005-4650.
8. Bur, R. Separation control by vortex generator devices in a transonic channel flow [Текст] / R. Bur, D. Coponet, Y. Carpels // Physics and Astronomy. – 2009. – №19(6). – P.521-530.
9. Babinsky, H. Micro-vortex generator flow control for supersonic engine inlets [Текст] / H. Babinsky, N.J. Makinson, C.E. Morgan // 45-TH AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. – 2007-521.
10. Menter, F.R. Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications [Текст] / F.R.Menter // AIAA. – 1994. – №32(11). – P.1299-1310.