

УДК 629.735.03

DOI: 10.18372/2310-5461.34.11618

Ю. М. Терещенко — д-р техн. наук, проф.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0003-4367-3232
e-mail: terj@nau.edu.ua;

К. В. Дорошенко — канд. техн. наук
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0001-6495-3263
e-mail: kiki_ua@ukr.net;

Ю. Ю. Терещенко — канд. техн. наук
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-1908-0923
e-mail: Terj-nau@ukr.net

П. Гамзег
Національний авіаційний університет
<http://orcid.org/0000-0003-4079-336X>
e-mail: paiaam@mail.ua

ТЕЧІЯ В'ЯЗКОГО ГАЗУ В ДИФУЗОРНОМУ КАНАЛІ З ТУРБУЛІЗАТОРАМИ

Вступ

Дифузорні канали використовуються для перетворення кінетичної енергії потоку в енергію тиску. Для мінімізації втрат повного тиску необхідно проектувати дифузорні канали без відриву потоку. Особливо актуальним є завдання забезпечення безвідривної течії в дифузорах з великим ступенем розширення. Головним засобом забезпечення безвідривної течії в цих випадках є вплив на відрив примежового шару.

При проектуванні дифузорні канали турбомашин і реактивних сопел повинні мати форму проточної частини, що забезпечує безвідривну течію в широкому діапазоні швидкості потоку на вході, а також мати рівномірні поля розподілу параметрів потоку на виході. Максимальна ефективність дифузора за одного і того ж ступеня розширення може бути отримана в каналі з якнайменшим значенням кута розкриття. В той же час малий кут розкриття приводить до збільшення довжини каналу, тобто до збільшення матеріаломісткості і ваги конструкції.

Турбулентний характер руху рідини і газу є найпоширенішим в елементах двигунів. Турбулентна течія супроводжується відривом потоку. Для дифузорних каналів відрив потоку визначається ступенем дифузорності каналу (геометричний фактор) і максимальним ступенем дифузорності потоку (в'язкість потоку).

Спеціальна турбулізація примежового шару в каналах дозволяє інтенсифікувати енергообмін у примежовому шарі і між примежовим шаром і ядром потоку. Це підвищує стійкість примежового шару до відриву [1, с. 285].

З метою створення додаткової турбулізації і активізації енергообміну в каналах застосовують турбулізатори, генератори вихорів, акустичні резонатори [2, с.109].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження, спрямовані на вивчення питань управління примежовим шаром досить різноманітні. У праці [1, с. 109] подані теоретичні основи управління примежовим шаром за допомогою встановлення турбулізаторів. У праці [3, с. 335] подано результати моделювання течії в решітці аеродинамічних профілів із різною густиною розміщення турбулізаторів. У праці [4, с. 051013–1; 5, с. 064502–1] автори представили результати дослідження впливу на режим обтікання використання турбулізаторів різної висоти на поверхні лопаток компресора.

У праці [6, с. 247] подано результати чисельного моделювання течії в осьовому компресорі Rotor 37 зі штучною шорсткістю. Автори досліджували вплив турбулізаторів на зміну ступеня підвищення тиску компресора. Також досліджувався вплив різного розташування турбулізаторів на характер течії в лопаткових вінцях ступенів осьового компресора. У результаті досліджень зроблено висновок, що турбулізатори доцільно встановлювати на спинці лопатки. Такий же висновок був зроблений раніше і праці [2, с. 110]. Питанню використання турбулізаторів в турбінних лопатках присвячено праці [7, с. 175; 8, с. 337], де досліджуються турбінні лопатки з турбулізаторами військових літаків. У праці [9, с. 36] наведено результати дослідження висоти турбулізаторів в дифузорному каналі.

Наведений вище огляд показує, що дослідження управління примежовим шаром за допомогою встановлення турбулізаторів в дифузорних каналах є актуальним. Питанням досліджень турбулізаторів присвячено багато робіт. Як видно, найбільш досліджувані параметри — це висота і розташування турбулізаторів на поверхні лопаток.

Мета статті

В роботі ставиться за мету дослідження впливу густини розміщення турбулізаторів в дифузорному каналі з великими кутом розкриття дифузору при числі Маха $M = 0,5$.

Виклад основного матеріалу

Характеристики дифузорних каналів дозволяють розмежувати режими їх роботи з метою аналізу їх ефективності. На першому етапі дослідження було проведене чисельне дослідження течії в дифузорних каналах з різним кутом розкриття. Об'єктом дослідження обрано плоский дифузор з прямолінійною твірною.

На рис. 1 зображено схему дифузору і характерні геометричні параметри: α — кут розкриття дифузору; h — висота вхідного перерізу; H — висота вихідного перерізу; L — довжина дифузору.

Довжина досліджуваного дифузору становить $L = 92$ мм, висота вхідного перерізу $h = 40$ мм.

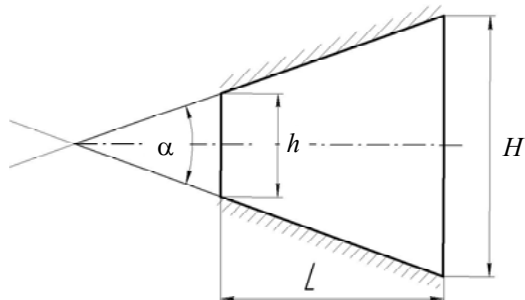
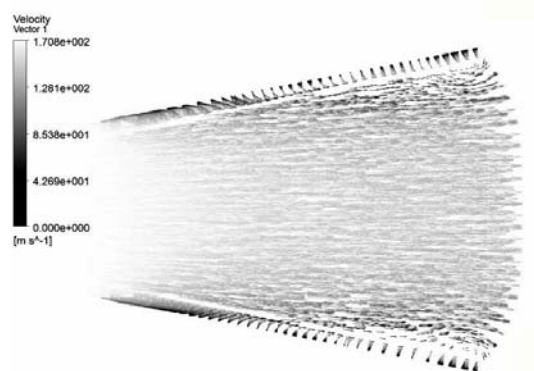


Рис. 1. Схема плоского дифузору

Було проведено серію розрахунків течії в гладеньких дифузорах при куті розкриття $\alpha = 6...40^\circ$.



$\alpha = 22^\circ$

Для моделювання турбулентних відривних течій використовуються осереднені рівняння Нав'є–Стокса, доповнені напівемпіричної моделлю турбулентності. Для даного класу задач добре себе зарекомендувала модель турбулентності SST Ментера.

Для розрахунку використовувалася дрібна нерегулярна адаптивна розрахункова сітка.

На рис. 2 зображено миттєве векторне поле швидкостей при числі Маха на вході $M_w = 0,5$ при кутах розкриття дифузору $\alpha = 22^\circ$ і $\alpha = 32^\circ$.

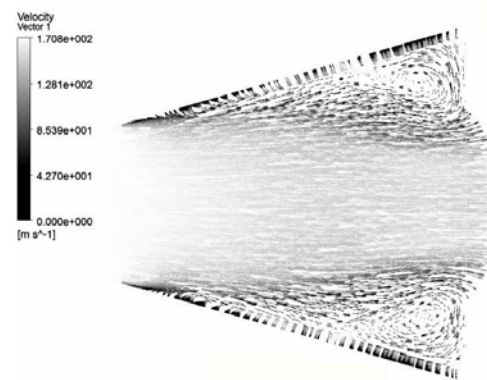
Зі зростанням кута α спостерігається ярко виражений відрив потоку з усталеною оберненоциркуляційною течією у вигляді декількох вихорів. За результатами розрахунку побудовано залежність коефіцієнта втрат повного тиску ξ від кута розкриття дифузору (рис. 3)

$$\xi = \frac{p_1^* - p_2^*}{\frac{\rho_1 w_1^2}{2}},$$

де $p_1^* - p_2^*$ — різниця тиску загальмованого потоку на вході і виході із дифузора; ρ_1 — густина повітря на вході в дифузор, w_1 — швидкість повітря на вході.

Отримані результати показують, що при збільшенні кута розкриття дифузора втрати енергії збільшуються.

Для запобігання небажаного відриву на стінках дифузора примежовий шар спеціально турбулізують за допомогою турбулізаторів. Параметри турбулізаторів (висота і їх розміщення) значною мірою визначають ефективність використання. Другим етапом досліджень передбачалось моделювання течії в дифузори з турбулізаторами при куті розкриття дифузора $\alpha = 32^\circ$. Дотримуючись рекомендацій [2, с. 110] щодо висоти і розміщення, висота досліджуваних турбулізаторів становила 0,5 мм. Турбулізатори розміщувались на вхідній ділянці — 30 % довжини дифузора.



$\alpha = 32^\circ$

Рис. 2. Векторне поле швидкості в гладкому дифузори

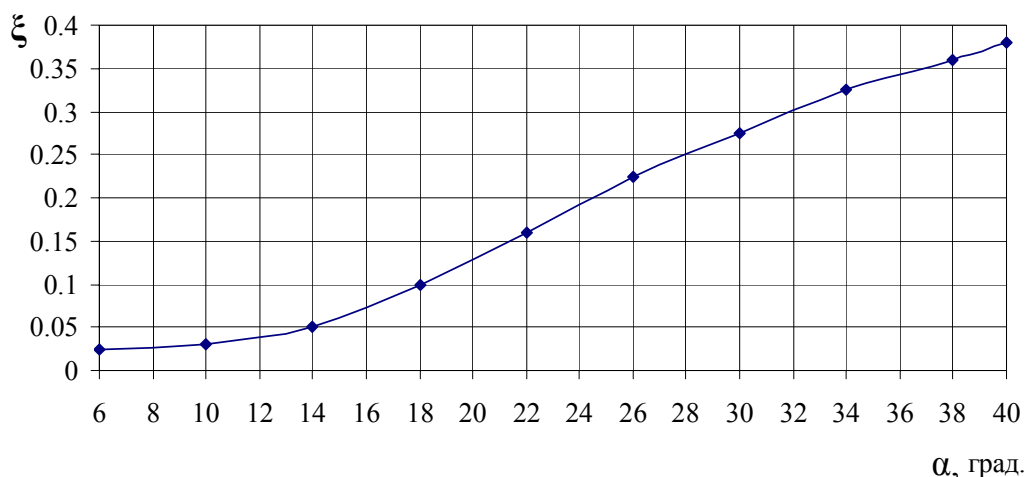


Рис. 3. Залежність коефіцієнта втрат повного тиску ξ від кута розкриття дифузору

У роботі досліджувалась течія в дифузорі з різною густиною розміщення турбулізаторів. Розміщення турбулізаторів на поверхні дифузора оцінювалось коефіцієнтом густини розміщення турбулізаторів [3]:

$$K_t = \frac{z \cdot S_t}{S_0},$$

де z — кількість турбулізаторів на поверхні дифузора; S_t — площа поперечного перерізу одного турбулізатора; S_0 — площа поверхні, на якій розташовані турбулізатори.

В роботі досліджувалися характеристики дифузоров при коефіцієнті густини розміщення турбулізаторів 0,5; 0,25; 0,125. На рис. 4 показано миттєве векторне поле швидкостей при числі

Маха на вході $M = 0,5$ при густині розміщення турбулізаторів 0,5.

Картина обтікання гладкого дифузора і дифузора з турбулізаторами показує, що має місце ефективне використання інтенсифікації енергообміну всередині примежового шару і між примежовим шаром і ядром потоку завдяки встановленню турбулізаторів. Турбулізатори створюють вихори, які взаємодіють з примежовим шаром, впливаючи на перемішування турбулентного шару, тим самим зтягаючи його відрив.

Для оцінки впливу коефіцієнту густоти розміщення турбулізаторів за результатами чисельного моделювання було розраховано коефіцієнт втрат повного тиску (рис. 5).

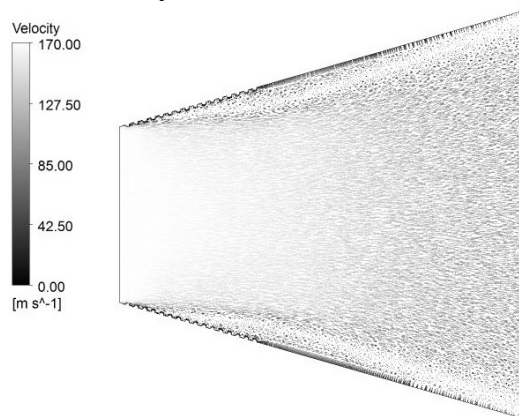


Рис. 4. Векторне поле швидкості в дифузорі з турбулізаторами

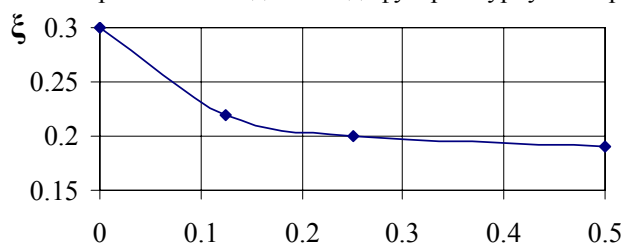


Рис. 5. Залежність коефіцієнта втрат повного тиску від коефіцієнта густини розміщення турбулізаторів

Результати чисельного моделювання течії в дифузори з кутом розкриття $\alpha = 32^\circ$ показали, що при установці турбулізаторів значення коефіцієнта втрат повного тиску знижується з 0,3 (для з гладенького дифузора) до 0,19...0,22. Результати чисельного моделювання показали, що густина розміщення турбулізаторів впливає на зміну рівня втрат. При коефіцієнті густини розміщення турбулізаторів $K_t = 0,5$ спостерігається зниження рівня втрат на 0,11 порівняно з гладеньким дифузором.

Висновки

Результати чисельного моделювання течії в гладких дифузорах показали, що при $\alpha > 20^\circ$ виникає відрив потоку, який супроводжується утворенням обернено-циркуляційної течії у вигляді вихорів. При збільшенні кута розкриття дифузора втрати енергії збільшуються.

Використання турбулізаторів на вхідній ділянці дифузального каналу з коефіцієнтом густини розміщення 0,125...0,5 призвело до зниження значення коефіцієнта втрат повного тиску з 0,3 до 0,19...0,22.

Перспективи подальших досліджень

У подальшому планується провести чисельне дослідження впливу на течію в дифузальному каналі турбулізаторів різної геометричної форми при різних числах Маха.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чжен П. Управление отрывом потока / П. Чжен. — М. : Мир, 1979. — 552 с.
2. Терещенко Ю. М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров / Ю. М. Терещенко. — М. : Машиностроение, 1987. — 168 с.
3. Терещенко Ю. М. Моделирование течий в компрессорных решетках с турбулизаторами на поверхности лопаток / Ю. М. Терещенко, К. В. Дорошенко, Ю. Ю. Терещенко // Наукоємні технології. — 2016. — № 3 (31). — Р. 335–352.
doi: 10.18372/2310-5461.31.10804 (ukr)
4. Back S. C. Effects of reynolds number and surface roughness magnitude and location on compressor cascade performance / S. C. Back, G. V. Hobson, S. J. Song, K. T. Millsaps // Journal of Turbomachinery. — 2012. — Vol. 134, Issue 5. — P. 051013-1—051013-6, doi: 10.1115/1.4003821 (eng)
5. Back S. C. Impact of surface roughness on compressor cascade performance / S. C. Back, J. H. Sohn, S. J. Song // Journal of Fluids Engineering. — 2010. — Vol. 132, Issue 6. — P. 064502-1-064502-6, doi: 10.1115/1.4001788 (eng)
6. Yang H. The effect of blade profile parameter on thermodynamic performance parameter of axial flow compressor / H. Yang, H. Xu / International Journal of Computer Applications in Technology. — 2014. — Vol. 50, Issue 3-4. — P. 247–252.
doi: 10.1504/IJCAT.2014.066736 (eng)
7. Taylor R. P. Surface roughness measurements on gas turbine blades / R. P. Taylor // Journal of Turbomachinery. — 1990. — Vol. 112, Issue 3. — P. 175–180, doi: 10.1115/1.2927630 (eng)
8. Bogard D. G. Characterization and laboratory simulation of turbine airfoil surface roughness and associated heated transfer / D. G. Bogard, D. L. Schmidt, M. Tabbita // Journal of Turbomachinery. — 1998. — Vol. 120, Issue 2. — P. 337–342, doi: 10.1115/96-GT-386 (eng)
9. Терещенко Ю. М. Моделирование течения в диффузном канале с турбулизаторами / Ю. М. Терещенко, Е. В. Дорошенко, Л. Г. Волянская // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2013. — №4/7(64). — С. 36–38. (rus)

Терещенко Ю. М., Дорошенко К. В., Терещенко Ю. Ю., Гамзег П.

ТЕЧІЯ В'ЯЗКОГО ГАЗУ В ДИФУЗОРНОМУ КАНАЛІ З ТУРБУЛІЗАТОРАМИ

Проведено серію розрахунків течії в гладеньких дифузорах при куті розкриття $\alpha = 6...40^\circ$. Для моделювання турбулентних відривних течій використовуються осереднені рівняння Нав'є–Стокса, доповнені напівемпіричною моделлю турбулентності SST. Результати чисельного моделювання течії в гладких дифузорах показали, що при $\alpha > 20^\circ$ виникає відрив потоку, який супроводжується утворенням обернено-циркуляційної течії у вигляді вихорів. При збільшенні кута розкриття дифузора втрати енергії збільшуються. В роботі представлені результати дослідження впливу густини розміщення турбулізаторів в дифузальному каналі з великими кутами розкриття дифузору при числі Маха $M = 0,5$. Досліджувалися характеристики дифузоров при коефіцієнті густини розміщення турбулізаторів 0,5; 0,25; 0,125. Використання турбулізаторів на вхідній ділянці дифузального каналу з коефіцієнтом густини розміщення 0,125 ... 0,5 призвело до зниження значення коефіцієнта втрат повного тиску з 0,3 до 0,19...0,22.

Ключові слова: дифузорний канал; турбулізатор; моделювання течії; коефіцієнт втрат повного тиску; зрив потоку.

Терещенко Ю. М., Дорошенко, К. В., Терещенко, Ю. Ю., Гамзег П.

ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОГО ГАЗА В ДИФFUЗОРНОМ КАНАЛЕ С ТУРБУЛИЗАТОРАМИ

Проведена серия расчетов течения в гладких диффузорах при угле раскрытия $\alpha=6...40^\circ$. Для моделирования турбулентных отрывных течений используются осредненные уравнения Навье–Стокса, дополненные полуэмпирической моделью турбулентности SST. Результаты численного моделирования течения в гладких диффузорах показали, что при $\alpha > 20^\circ$ возникает отрыв потока, который сопровождается образованием обратноциркуляционного течения в виде вихрей. При увеличении угла раскрытия диффузора потери энергии увеличиваются. В работе представлены результаты исследования влияния плотности размещения турбулизаторов в диффузорном канале с большим углом раскрытия диффузора при числе Маха $M = 0,5$. Исследовались характеристики диффузоров при коэффициенте плотности размещения турбулизаторов 0,5; 0,25; 0,125. Использование турбулизаторов на входном участке диффузорного канала с коэффициентом плотности размещения 0,125 ... 0,5 привело к снижению значения коэффициента потерь полного давления с 0,3 до 0,19 ... 0,22.

Ключевые слова: диффузорный канал; турбулизатор; моделирование течения; коэффициент потерь полного давления; срыв потока.

Tereshchenko Yu. M., Doroshenko K. V., Tereshchenko Yu. Yu., Hamzeg P.

FLOW OF A VISCOUS GAS IN A DIFFUSER CHANNEL WITH TURBULATORS

A calculation series of flow in smooth diffusers with an opening angle $\alpha = 6 \dots 40^\circ$ was carried out. Turbulent separated flows were calculated using the averaged Navier–Stokes equations with the turbulence model SST. The results of flow numerical simulation in smooth diffusers have shown that at $\alpha > 20^\circ$ there is a flow separation, which is accompanied by the formation of a back-circulation flow in the form of vortices. The energy losses increase with increasing of the angle of the diffuser opening. The paper presents the results of a study of the effect of the density of the accommodation of turbulators in a diffuser channel with a large opening angle of the diffuser at Mach number $M = 0.5$. The characteristics of the diffusers were studied at a turbulator density coefficient of 0.5; 0.25; 0.125. The use of turbulators at the entrance section of the diffuser channel with a density coefficient of 0.125 ... 0.5 resulted in a decreasing of the value of the total pressure loss coefficient from 0.3 to 0.19 ... 0.22.

Keywords: public management; state informative resources; public information; public state informative resources; public informative system; system of public management.

Стаття надійшла до редакції 17.05.2017 р.

Прийнято до друку 22.05.2017 р.

Рецензент – д-р техн. наук, проф. Тамаргазін О. А.