УДК 629.735.03:621.43.031.3(045)

Ю. Ю. ТЕРЕЩЕНКО

Національний авіаційний університет, Київ

ВПЛИВ ВИСОТИ ЕЛЕМЕНТІВ ШТУЧНОЇ ШОРСТКОСТІ НА ТЕЧІЮ В ДИФУЗОРНОМУ КАНАЛІ

В роботі представлені результати дослідження щодо оцінки впливу зміни висоти елементів штучної шорсткості на рівень втрат в дифузорному каналі. Показано, що встановлення штучної шорсткості впливає на параметри потоку в дифузорному каналі. Використання елементів штучної шорсткості, висота яких поступово зростає, призводить до зменшення рівня гідравлічних втрат в дифузорному каналі.

Ключові слова: *штучна шорсткість, дифузорний канал, моделювання течії, сили в'язкості, турбулентність.*

Вступ. При градієнтній течії в дифузорних каналах в пограничному шарі можуть виникати вторинні течії, які обумовлюють збільшення опору обтічного тіла. Відрив потоку супроводжується різкою зміною параметрів потоку і виникненням зони, в якій робоче тіло в дифузорному каналі рухається проти наростаючого тиску. За певних умов кінетичної енергії в пограничному шарі поблизу стінки в дифузорному каналі не вистачає енергії для забезпечення протидії наростаючого тиску. В цьому випадку лінії струму відходять від поверхні і в області, що утворилася, виникає поворотна течія – утворюється стійка вихрова зона.

Положення точки відриву визначається величиною градієнта тиску dp/dx і профілем швидкості u в пограничному шарі. В точці відриву $du/dy = 0$. Збільшення dp/dx при незмінному профілі швидкості приводить до зсуву точки відриву проти потоку. З другого боку, чим більш повним буде профіль швидкості, тобто чим більшою енергією володітимуть частинки робочого тіла безпосередньо біля стінки при заданому градієнті тиску dp/dx, тим пізніше наступить зрив.

З метою запобігання дії вторинних течій доцільно інтенсифікувати процес перемішування в пограничному шарі шляхом примусової турбулизації потоку з боку обтічної поверхні або шляхом підведення енергії з ядра потоку. Штучна шорсткість є прикладом пристроїв, що підсилюють перемішування шляхом створення подовжніх вихорів. Створювані штучною шорсткістю вихори можна вважати механізмом перебудови течії, вплив якого зберігається на значній відстані по потоку. Фізичні передумови використання штучної шорсткості на ізольованих поверхнях ґрунтуються на підвищенні стійкості пограничного шару за рахунок примусового переходу течії з ламінарного стану в турбулентний. Дослідження, результати яких приведені в монографіях [1–3], показали, що наявність елементів штучної шорсткості на поверхні ізольованих профілів і на стінках каналів приводить до істотної зміни їх гідравлічних втрат.

Для більш коректної оцінки впливу штучної шорсткості на течію в градієнтних каналах необхідно досліджувати вплив параметрів штучної шорсткості на формування пограничного шару. В роботі [4–5] було показано, що наявність шорсткості в початковій ділянці дифузорного каналу призводить до зменшення рівня втрат. Проте, вплив зміни висоти шорсткості на поверхні дифузорного каналу досліджено не було.

Постановка завдання. Метою роботи є оцінка впливу зміни висоти елементів штучної шорсткості на рівень втрат в дифузорному каналі.

Результати дослідження. В даній роботі розрахунок турбулентного течії газу виконується шляхом чисельного вирішення осереднених рівнянь Навье – Стокса (рівняння Рейнольдса). При осередненні за часом в рівняннях з'являються нові члени, які можна інтерпретувати як градієнти додаткових напруг і теплових потоків, пов'язаних з турбулентним рухом. Ці нові величини повинні бути пов'язані з характеристиками осередненої течії за допомогою моделей турбулентної в'язкості. На сьогоднішній день існує безліч різних моделей турбулентної в'язкості. В даній роботі розрахунок використовувалася модель турбулентної в'язкості SST [7], яка записується шляхом суперпозиції моделей k–ε і k–ωі ґрунтується на тому, що моделі типу k–ε краще описують властивості вільних зсувних течій, а моделі k–ω мають перевагу при моделюванні пристіночних течій. Плавний перехід від k–ω моделі в пристіночній області до k–ε моделі в ядрі потоку забезпечується введенням вагової емпіричної функції F_1 .

Чисельне вирішення задач газової динаміки досягається шляхом дискретизації початкових диференціальних рівнянь на якій-небудь розрахунковій сітці. Дискретизація – це процес, при якому диференціальні рівняння замінюються дискретними аналогами, тобто трансформуються в алгебраїчні рівняння щодо значень невідомих величин у вузлах розрахункової сітки. Для вирішення поставленої задачі використовується метод контрольного об'єму (МКО). При використанні МКО розрахункова область розбивається на деяке число непересічних комірок – контрольних об'ємів, таким чином, що кожна вузлова точка міститься в одному контрольному об'ємі. Диференціальне рівняння інтегруються за кожним контрольним об'ємом. В результаті знаходяться дискретні аналоги диференціальних рівнянь, в які входять значення невідомих величин в декількох вузлових точках. Отримані так само дискретні аналоги виражають закон збереження невідомих величин для кінцевого контрольного об'єму точно так, як і диференціальні рівняння виражають закони збереження для нескінченно малого об'єму. Для моделювання течії в дифузорному каналі використовувалася дрібна нерегулярна адаптивна розрахункова сітка.

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=40мм.

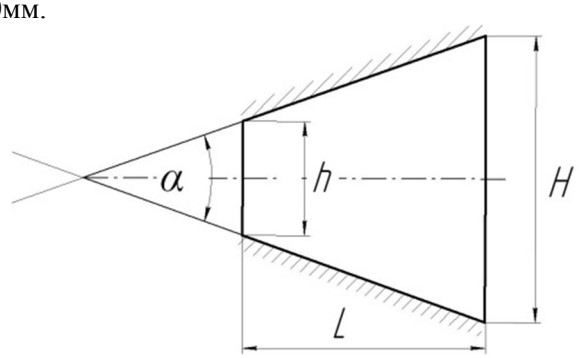
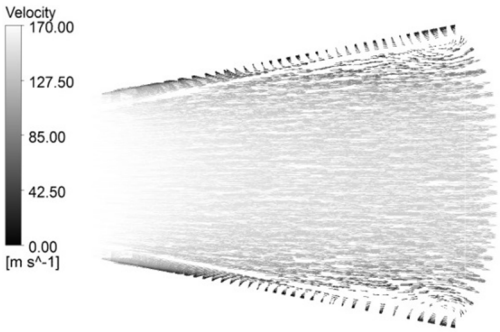
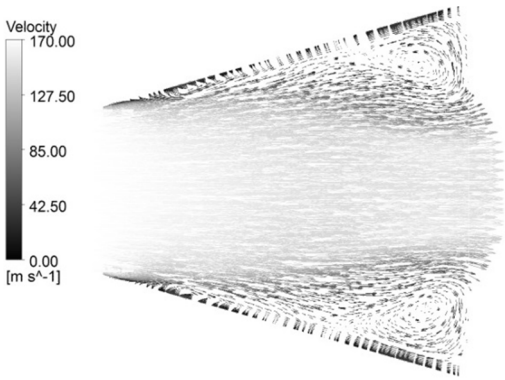


Рис.1. Схема плоского дифузору

Було проведено серію розрахунків течії в гладких дифузорах при куті розкриття α = 20º…32º. На рис. 2 представлено миттєве векторне поле швидкостей при числі Маха на вході M_w=0,5 при кутах розкриття дифузору α=22º і α=32º



а



б

Рис. 2. Векторне поле швидкості в гладкому дифузорі
а – дифузорний канал з кутом α=22º; *б* – дифузорний канал з кутом α=32º

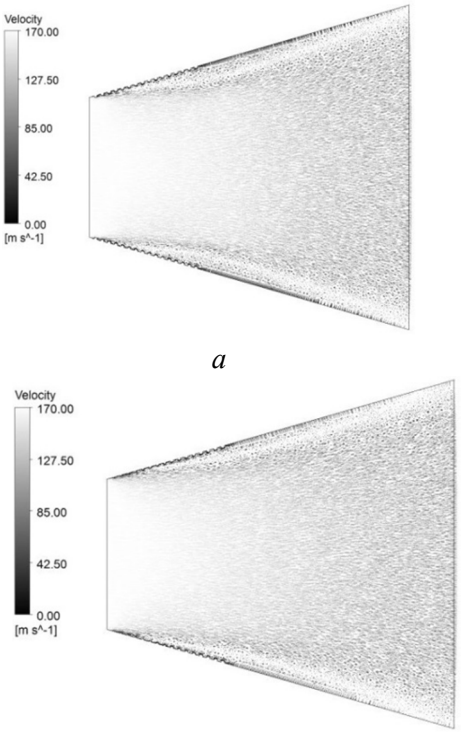
Представлені картини обтікання показують, що зі зростанням кута α спостерігається виражений відрив потоку з обернено-циркуляційною течією у вигляді декількох вихорів.

Для запобігання небажаного відриву на стінках дифузора пограничний шар спеціально турбулізують за допомогою елементів штучної шорсткості. Параметри елементів штучної шорсткості (висота і їх розміщення) значною мірою визначають ефективність їх використання.

Другим етапом досліджень передбачалось моделювання течії в дифузорі з штучною шорсткістю при кутах розкриття дифузора α = 20º…32º. Дотримуючись рекомендацій [2] щодо розміщення, елементи штучної шорсткості розміщувались на вхідній ділянці – 30% довжини дифузора. Висота елементів шорсткості змінювалась від 0,5 мм до 0,2 мм. В роботі розглянуто три варіанти дифузорних канала з штучною шорсткістю. Варіант №1 – дифузорний канал з незмінною висотою елементів штучної шорсткості, яка дорівнює 0,5 мм. Варіанти № 2 і 3 – дифузорні канали зі змінною по довжині висотою елементів штучної шорсткості. Варіант №2 має елементи штучної шорсткості, висота яких поступово зменшується: 1–4 ряд елементів штучної шорсткості – 0,5мм, 2–8 ряд елементів штучної шорсткості – 0,4 мм, 9–12 ряд елементів штучної шорсткості – 0,3мм і 13–16 ряд – 0,2 мм. Варі-

ант дифузорного каналу №3, навпаки має елементи штучної шорсткості, висота яких поступово зростає: 1–4 ряд елементів штучної шорсткості – 0,2мм, 2–8 ряд елементів штучної шорсткості – 0,3 мм, 9–12 ряд елементів штучної шорсткості – 0,4мм і 13–16 ряд – 0,5 мм.

На рис. 3 представлено векторне поле швидкостей при числі Маха на вході $M = 0{,}5$ для дифузорних каналів №1 і №3.



а

б

Рис. 3. Векторне поле швидкості в дифузорному каналі з штучною шорсткістю
а – варіант №1; *б* – варіант №3

Векторні поля швидкості, представлені на рис. 2 і 3 показують, що характер обтікання змінюється при застосування на поверхні дифузорного каналу елементів штучної шорсткості. В дифузорних каналах з штучною шорсткістю має місце ефективна інтенсифікації енергообміну всередині пограничного шару і між пограничним шаром і ядром потоку. Елементів штучної шорсткості створюють вихори, що взаємодіють з пограничним шаром, впливаючи на перемішування турбулетного шару, тим самим затягуючи його відрив.

Для оцінки впливу ефективності застосування елементів штучної шорсткості за результатами чисельного моделювання було розраховано коефіцієнт втрат повного тиску (рис.4).

Коефіцієнт втрат повного тиску ξ розраховується за формулою:

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

де $(p_1^* - p_2^*)$ – тиск 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 збільшується.

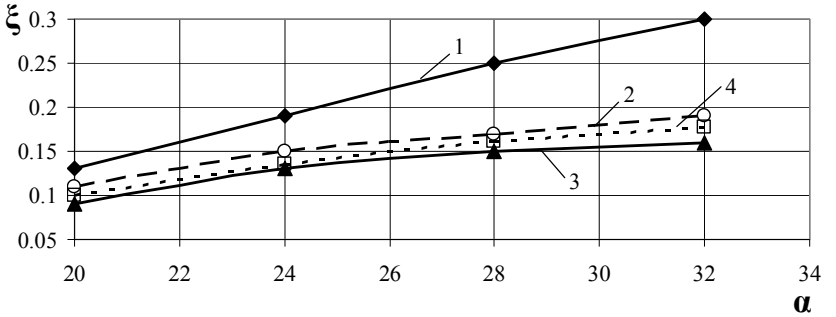


Рис. 4. Залежність коефіцієнта втрат повного тиску ξ від кута розкриття дифузору: *1* – гладкий дифузор; *2* – варіант дифузора №1; *3* – варіант дифузора №2; *4* – варіант дифузора №3

Встановлення елементів штучної шорсткості на початковій ділянці дифузорного каналу призводить до зменшення рівня гідравлічних втрат. При збільшенні кута розкриття дифузорного каналу позитивний ефект застосування елементів штучної шорсткості збільшується. При незмінній висоті елементів штучної шорсткості при куті розкриття дифузорного каналу $\alpha = 32^\circ$ досягається зменшення рівня гідравлічних втрат з $\xi = 0{,}3$ до $\xi = 0{,}19$. В дифузорних каналах зі змінною по довжині висотою елементів штучної шорсткості при куті розкриття дифузорного каналу $\alpha = 32^\circ$ відбувається зменшення рівня гідравлічних втрат з $\xi = 0{,}3$ до $\xi = 0{,}16\ldots0{,}18$.

Висновки. Результати чисельного моделювання течії в дифузорних каналах показали, що встановлення штучної шорсткості впливає на параметри потоку. При встановленні елементів штучної шорсткості на початковій ділянці дифузорного каналу рівень гідравлічних втрат при кутах розкриття дифузору $\alpha = 20\ldots32^\circ$ може бути зменшено з $\xi = 0{,}11\ldots0{,}3$ до $\xi = 0{,}09\ldots0{,}16$.

В дифузорних каналах елементи штучної шорсткості, висота яких поступово зростає, при куті розкриття дифузорного каналу $\alpha = 32^\circ$ відбувається зменшення рівня гідравлічних втрат з $\xi = 0{,}3$ до $\xi = 0{,}16$.

Список літератури

1. Терещенко Ю.М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров / Ю.М. Терещенко – М.: Машиностроение, 1987. – 168с.

2. Чжен П. Управления отрывом потока / П.Чжен – М.: Мир, 1979. – 365с.

3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.

4. Терещенко, Ю.М. Моделювання течії в компресорних решітках з турбулізаторами на поверхні лопаток / Ю.М. Терещенко, К.В. Дорошенко, Ю.Ю. Терещенко // Наукоємні технології. – 2016. – *№.* 3 (31). – P. 335–352. doi:10.18372/2310-5461.31.10804

5. Терещенко Ю.М. Моделирование течения в диффузоном канале с турбулизаторами / Ю.М. Терещенко, Е. В. Дорошенко, Л. Г. Волянская // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. - №4/7(64). – С.36-38.

6. 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.

7. Menter F.R. Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications// AIAA J. – 1994. – 32, №11. – P.1299–1310.

Стаття надійшла до редакції 28.08.2017.

Yu. Yu. TERESHCHENKO

INFLUENCE OF HEIGHT OF ARTIFICIAL ROUGHNESS ELEMENTS ON FLOW IN DIFFUSER CHANNEL

In the work a series of calculations of flow in diffusers at an opening angle 20°...32° was carried out. With an increase in the opening angle in smooth diffusers the flow separation with the several vortices is observed. The paper presents the results of the study on the effect of the change in the height of the elements of artificial roughness on the losses level in the diffuser channel. The elements of artificial roughness were located in the entrance area of the diffuser. The height of the roughness elements varied from 0.5 mm to 0.2 mm. The results of the research have shown that the installation of artificial roughness influences the flow parameters in the diffuser channel. The use of elements of artificial roughness, the height of which gradually increases, leads to a decrease in the level of hydraulic losses in the diffuser channel.

Keywords: artificial roughness, diffuser channel, calculations of flow, viscosity, turbulence.

References

1. Tereshhenko Yu.M. Ajerodinamicheskoe sovershenstvovanie lopatochnyh apparatov kompressorov / Ju.M. Tereshhenko – M.: Mashinostroenie, 1987. – 168s.

2. Chzhen P. Upravlenija otryvom potoka / P.Chzhen – M.: Mir, 1979. – 365s.

3. Shlihting G. Teorija pogranichnogo sloja / G. Shlihting. – M.: Nauka, 1974. – 712 s.

4. Tereshhenko, Yu.M. Modeljuvannja techiї v kompresornih reshitkah z turbulizatorami na poverhni lopatok / Yu. M. Tereshhenko, K.V. Doroshenko, Ju. Ju. Tereshhenko // Naukoємni tehnologiї. – 2016. – №. 3 (31). – P. 335–352. doi:10.18372/2310–5461.31.10804.

5. Tereshhenko Yu.M. Modelirovanie techenija v diffuzonom kanale s turbulizatorami / Yu.M. Tereshhenko, E. V. Doroshenko, L. G. Voljanskaja // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. – 2013. – №4/7(64). – S.36–38.

6. 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.

7. Jun A.A. Teorija i praktika modelirovanija turbulentnyh techenij / A.A. Jun. – M.: Knizhnyj dom «Librokom», 2009. – 272s.

Терещенко Юрій Юрійович – канд. техн. наук, асистент кафедри авіаційних двигунів Національного авіаційного університету, м. Київ, пр. Комарова, 1, тел. 044-406-75-93.Terj@nau.edu.ua