

УДК 621.45.032:532.517.4

doi: 10.32620/aktt.2023.4.04

І. І. ЮДІН

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

ОЦІНКА ВПЛИВУ КАНАВОК У ДИФУЗОРІ НА ВТРАТИ ПОВНОГО ТИСКУ

Предметом дослідження є повний тиск в дифузорному каналі з пасивним управлінням примежовим шаром. **Об'єктом дослідження** є дифузорний канал з канавками. Механізм зниження опору за рахунок присутності на обтічній поверхні поздовжніх канавок пов'язаний з обумовленим ними посиленням сил в'язкості, що діють в поперечному напрямку. Ці сили породжують порівняно спокійний плин в западинах між ребрами, який виштовхує турбулентний плин, що обумовлює поверхневе тертя, відтісняючи його від поверхні. Тим самим змінюється процес генерації і зростання витягнутих пристінкових турбулентних утворень. Крім того, при наявності поздовжніх канавок можлива зміна поля тиску в поперечному напрямку, а також створення квазидвувимірної течії в безпосередній близькості від стінки. **Ціллю** є завдання розрахункового дослідження впливу канавок на втрати повного тиску у дифузорному каналі, з метою оцінки впливу канавок на зміну характеру течії та зміну тиску. Для досягнення цілі були вирішені **задачі**: змодельована дифузорний канал котрий мав наступні розміри: довжину $L=50$ мм, гідравлічний діаметр на вході $X=25$ мм, гідравлічний діаметр на виході $Y=40$ мм, діаметр канавки $d=4$ мм, кількість канавок $n=4$ та $n=8$. Дослідження порівнювалось з дифузором, з наступними розмірами: довжина $L=50$ мм, діаметр на вході $X=25$ мм, діаметр на виході $Y=40$ мм. Для дослідження течії у дифузорі обрано **метод** чисельного експерименту. Для проведення дослідження в дифузорі використовувалась дрібна неструктурована розрахункова сітка. Розрахунок турбулентної течії газу виконано шляхом чисельного розв'язання осереднених рівнянь Нав'є-Стокса. Під час чисельного моделювання течії використовувалась модель турбулентної в'язкості Reynolds stress. **Отже, в результаті** при використанні дифузору з поздовжніми канавками маємо збільшення коефіцієнту гідравлічного опору відносно гладкого дифузору. Механізм зниження опору не діє через відносно невелику довжину дифузору і малі поздовжні вихори масштабу канавок не встигають утворюватися. Замість ламінізації потоку спостерігаються додаткові збудження. **Наукова новизна** - отримані нові дані щодо впливу канавок в дифузорному каналі на коефіцієнт втрат повного тиску. **Практичне значення** - отримані результати можна використовувати при керуванні примежовим шаром у дифузорних каналах (у дифузорних компресорних решітках) з метою покращення їх характеристик.

Ключові слова: дифузорний канал; канавки; примежовий шар; чисельне моделювання.

Вступ

Відомо, що в останні два-три десятиліття з особливою гостротою постала проблема енергозбереження. Не викликає сумнівів, що в майбутньому цей процес буде тільки посилюватися. Особливо при проектуванні повітряного, водного і швидкісного наземного транспорту, зазначена проблема стимулює дослідження, спрямовані на вивчення можливостей зниження опору літального апарату та інших рухомих об'єктів.

Існують два основні шляхи зменшення складової сил тертя. Один з них традиційно базується на вдосконаленні аеродинамічних форм і поліпшенні якості обробки поверхні літального або теплообмінного апарату. Однак при польоті звичайного транспортного літака число Рейнольдса досягає величин порядку 10^8 і навряд чи при таких умовах вдасться розробити економічний режим підтримки ламінарної

форми течії, це означає, що, принаймні всі великі резерви зниження опору тут практично вичерпані. Другий шлях заснований на використанні штучних методів управління структурою пристінної турбулентності.

З середини 70-х років накопичено чималий досвід з вивчення можливості зниження турбулентного тертя за допомогою різних як пасивних, так і активних методів управління турбулентними зсувними течіями.

Ієрархію управління турбулентним зсувними потоком можна побачити на рис. 1 [1]. З цієї схеми, зокрема, випливає, що найбільший розвиток в даний час отримали активні методи, в основі яких в більшості випадків лежить або система, що відповідає на будь-які дії, або – зі зворотним зв'язком, або навіть найбільш досконала - самоналагоджувальна система.

Однак і пасивні методи управління не втратили свого значення в основному з тієї причини, що при їх

використанні не потрібно вкладати енергію для досягнення ефекту зменшення опору. Подібні методи пасивні в тому сенсі, що в них не передбачений ланцюг зворотного зв'язку для виявлення і маніпулювання тими структурами, які є об'єктом управління. Тому робоча вартість таких способів управління набагато менша, ніж активних.



Рис. 1. Схема, що ілюструє ієрархію управління турбулентним потоком

Аналіз попередніх досліджень

Ефективний вплив на структуру пристінної турбулентності неможливо без чіткого розуміння сутності сучасних методів управління примежовим шаром, їх основних особливостей, можливих шляхів їх розвитку в найближчій перспективі і специфіки використання гідро-,газодинаміці.

Щоб уявити динаміку і тенденції розвитку в цьому напрямку, розглянемо лише найбільш перспективні і швидко прогресуючі способи управління, які застосовуються головним чином в нестискуваних течіях і мають безпосереднє відношення до зниження турбулентного тертя:

Одне з найважливіших напрямків досліджень, яке залишається актуальним і на сьогоднішній день, полягає в необхідності вивчення ефективності використання в турбулентному потоці зовнішніх маніпуляторів, таких як пристрій руйнування вихорів (ПРВ).

Сутність ідеї застосування ПРВ полягає у використанні найчастіше горизонтальних тонких пластин (або інших елементів), розташованих в турбулентному примежовому шарі в напрямку потоку або під невеликим кутом атаки і призначених для руйнування великих вихрових (когерентних) структур, масштаб яких можна порівняти з товщиною примежового шару

Основна складність полягає в тому, що, при великих числах Рейнольдса, неможливо створити мініатюрні ПРВ, розміри яких були можна порівняти з характерними масштабами турбулентності. Тому більшість зазначених пристроїв, створюючи корисний

ефект, самі є джерелом додаткового аеродинамічного опору [2].

Механізм зниження опору за рахунок присутності на обтічній поверхні поздовжніх канавок (канавок - riblets - в англійській термінології) пов'язаний з обумовленим ними посиленням сил в'язкості, що діють в поперечному (не плутати з трансверсальним) напрямку. Ці сили породжують порівняно спокійний плин в западинах між ребрами, який виштовхує турбулентний плин, що обумовлює поверхневе тертя, відтісняючи його від поверхні. Тим самим змінюється процес генерації і зростання витягнутих пристінкових турбулентних утворень, про які йшлося вище. Крім того, при наявності ріблет можлива зміна поля тиску в поперечному напрямку, а також створення квазідвувимірної течії в безпосередній близькості від стінки [2]

Крім цього, структуровані поверхні можуть створювати когерентні великомасштабні вихри в пристінній області систем, які суттєво інтенсифікують теплообмін, незначно підвищують опір потоку, що рухається [3].

Постановка задачі

У цій роботі ставиться завдання розрахункового дослідження впливу канавок на втрати повного тиску у дифузорному каналі, з метою оцінки впливу канавок на зміну характеру течії та зміну тиску, шляхом чисельного моделювання.

Методика проведення досліджень

Для дослідження течії в у дифузорі обрано метод чисельного експерименту. Чисельний експеримент включає наступні етапи:

- побудова геометричної моделі;
- побудова розрахункової сітки;
- визначення початкових і граничних умов;
- чисельне вирішення задачі;
- візуалізація розв'язку задачі;
- аналіз розв'язку.

Для проведення дослідження в дифузорі використовувалась дрібна неструктурована розрахункова сітка. Розрахунок турбулентної течії газу в буде виконано шляхом чисельного розв'язання осереднених рівнянь Нав'є-Стокса. Під час чисельного моделювання течії буде використовуватись модель турбулентної в'язкості Reynolds stress [4].

Рішення задачі та аналіз результатів

Для дослідження характеру течії у дифузорному каналі було змодельовано дифузорний канал котрий мав наступні розміри: довжину $L=50$ мм, гідравлічний діаметр на вході $X=25$ мм, гідравлічний діаметр на виході $Y=40$ мм, діаметр канавки $d=4$ мм, кількість

канавок $n=4$ (рис. 2, а, б), та $n=8$ (рис. 3, а, б). Дослідження порівнювалось з дифузором, з наступними розмірами: довжина $L=50$ мм, діаметр на вході $X=25$ мм, діаметр на виході $Y=40$ мм (рис. 4, а, б)

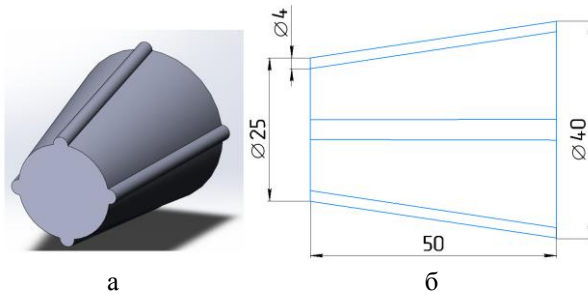


Рис. 2. Схема дифузрного каналу з 4 канавками:
а – 3D модель, б – схема дифузрного каналу

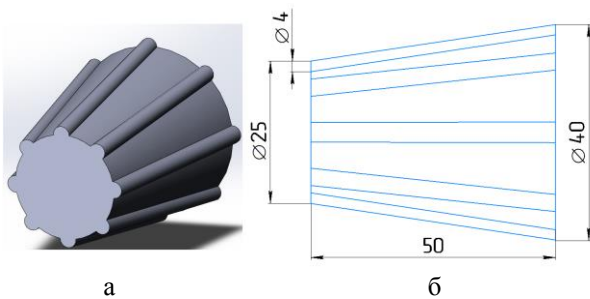


Рис. 3. Схема дифузрного каналу з 4 канавками:
а – 3D модель, б – схема дифузрного каналу

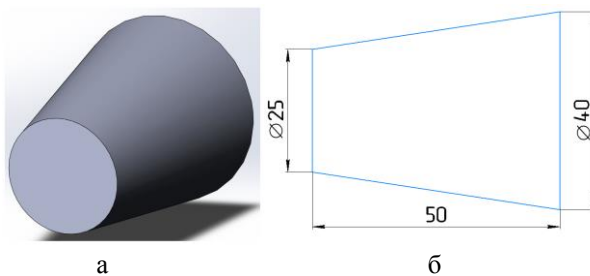


Рис. 4. Схема дифузрного каналу:
а – 3D модель, б – схема дифузрного каналу

Розрахунок проводився для критерію Рейнольдса $Re=2 \cdot 10^5$. Експеримент передбачав дослідження впливу кількості канавок на зміну втрат повного тиску у дифузрному каналі. Висота канавки вибиралась таким чином, щоб бути рівною товщині примежового шару δ , $\delta=2$ мм. Згідно товщина примежового шару у трубі знаходиться за формулою

$$\delta = 0,37 \cdot l \cdot Re^{-0,2},$$

де, l – довжина каналу.

Для проведення дослідів була побудована розрахункова сітка з кількістю комірок $k=3,5$ млн для трьох дифузрів.

В якості робочого тіла використовувалось повітря при нормальних атмосферних умовах.

На рис. 5, рис. 6 та рис. 7 зображені поля швидкості вздовж осі дифузру без канавок, з 4 канавками та з 8 канавками відповідно.

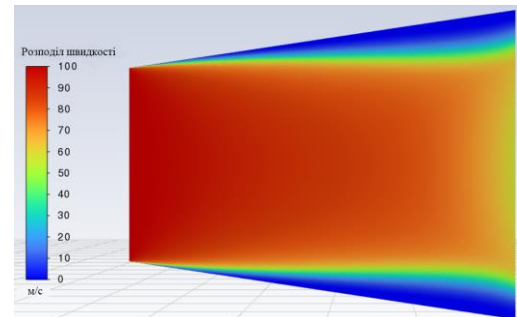


Рис. 5. Розподіл швидкості вздовж дифузру без канавок

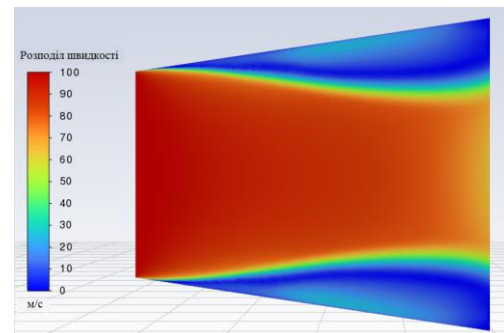


Рис. 6. Розподіл швидкості вздовж дифузру з 4 канавками

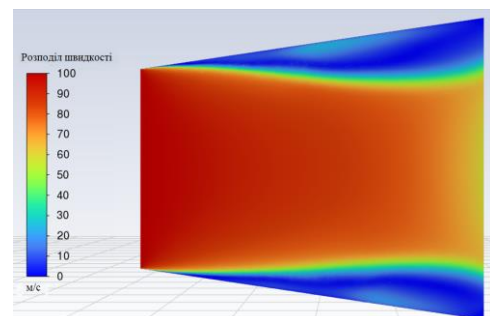


Рис. 7. Розподіл швидкості вздовж дифузру з 8 канавками

Використання канавок інтенсифікує енергію в примежовому шарі змінюючи характер течії. З рисунків видно збільшення товщини примежового шару у дифузрорах з канавками.

На рис. 8, рис. 9 та рис. 10 зображені поля швидкості на виході із дифузррного каналу без канавок, з 4 канавками та 8 канавками відповідно

З рисунків 6-8 видно, що канавки вносять зміни на наростання примежового шару.

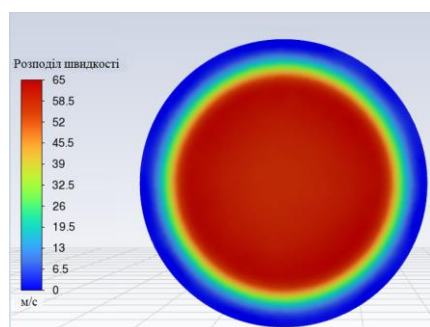


Рис. 8. Поле швидкості на виході із дифузору

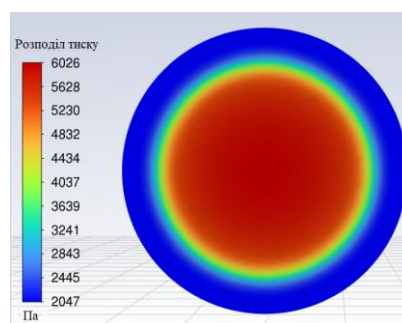


Рис. 11. Поле тиску на виході із дифузору

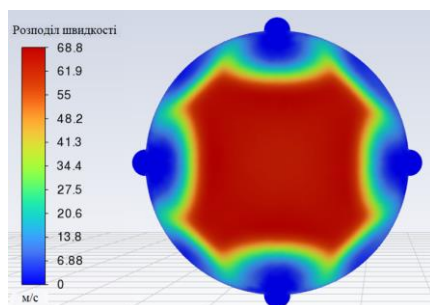


Рис. 9. Поле швидкості на виході із дифузору із 4 канавками

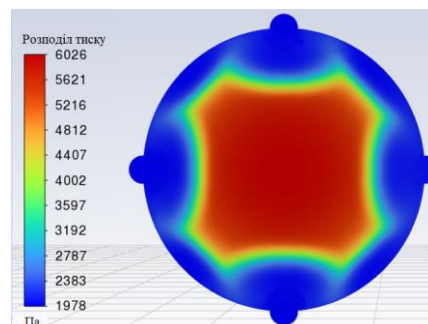


Рис. 12. Поле тиску на виході із дифузору із 4 канавками

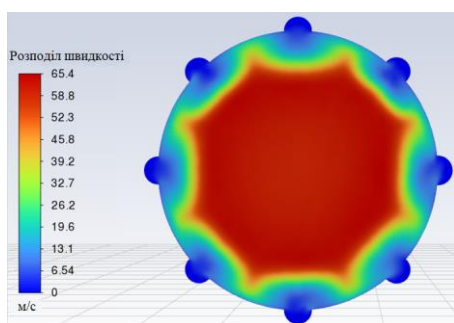


Рис. 10. Поле швидкості на виході із дифузору із 8 канавками

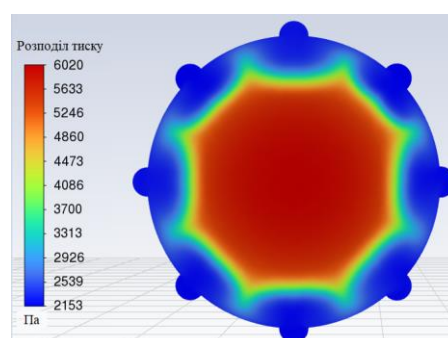


Рис. 13. Поле тиску на виході із дифузору із 8 канавками

На рис. 11, рис. 12 та рис. 13 зображено профілі тисків на виході із дифузорового каналу без канавок, з 4 канавками та 8 канавками відповідно.

Середня швидкість потоку у дифузори, та дифузорах з 4 та 8 канавками становила $c_1=77$ м/с, $c_2=77$ м/с, $c_3=77$ м/с відповідно. Втрати повного тиску $\Delta P_1=279,5$ Па; $\Delta P_2=462,6$ Па; $\Delta P_3=373,7$ Па.

Коефіцієнт гідравлічного опору, визначений за формулою:

$$\zeta = \frac{2\Delta P}{\rho w^2} \cdot \frac{d_r}{l_{тр}}$$

Для гладкого дифузору $\zeta=0,05$, для дифузору з 4 канавками $\zeta=0,085$, для дифузору з 8 канавками $\zeta=0,07$.

Висновки

При використанні дифузору з повздовжніми канавками маємо збільшення коефіцієнту гідравлічного опору відносно гладкого дифузору. Механізм зниження опору не діє через відносно невелику довжину дифузору і малі повздовжні вихори масштабу канавок не встигають утворюватися. Замість ламінації потоку спостерігаються додаткові збудження.

Для дослідження ламінації потоку за допомогою повздовжніх канавок планується дослідити рух потоку рідини у дифузори з при іншій швидкості рідини на вході та при інших розмірах та формах канавок.

Література

1. Choi, K. *Turbulent Drag-Reduction Mechanisms: Strategies for Turbulence Management [Text]* / K. Choi. – Springer-Verlag, 2001. – P. 161-212.
2. Формування турбулентності в зсувних потоках [Текст] / Л. Ф. Козлов, А. И. Циганюк, В. В. Бабенко, Г. А. Воропаев. – К. : Наук. Думка. – 1985. – 284 с.
3. Баскова, А. А. Влияние геометрии гофрированной поверхности на структуру течения и интенсивность теплообмена в трубе [Текст] / А. А. Баскова, Г. А. Воропаев // *Энергетика: экономика, технологии, экология*. – 2018. – Том 52, №2. – С. 85 – 95.
4. Kim, W. *Immersed boundary methods for fluid-structure interaction: A review[Text]* / W. Kim, H. Choi // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. Elsevier. – 2019. – P. 301-309.

References

1. Choi, K. *Turbulent Drag-Reduction Mechanisms : Strategies for Turbulence Management*. Springer-Verlag, 2001, pp. 161-212.
2. Kozlov, L. F., Tsyganyuk, A. I., Babenko, V. V. & Voropaev, G. A. *Formuvannya turbulentnosti v zsvny'x potokax* [Formation of turbulence in shear flows]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1985. 284 p.
3. Baskova, O. O. & Voropaev, G. O. *Vliyaniye geometrii gofrirovannoy poverkhnosti na strukturu techeniya i intensivnost' teploobmena v trube* [The influence of the geometry of the corrugated surface on the structure of motion and the intensity of heat exchange in the pipe]. *Energety'ka: ekonomika, tekhnologiyi, ekologiya* – *Energy: economy, technologies, ecology*, 2018, vol. 52, no. 2, pp. 85-95.
4. Kim, W. & Choi, H. *Immersed boundary methods for fluid-structure interaction: A review*. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. Elsevier, 2019, pp. 301-309.

Надійшла в редакцію 03.06.2023, розглянута на редколегії 08.08.2023.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF GROOVES IN THE DIFFUSER ON TOTAL PRESSURE LOSSES

Illia Yudin

The subject of the study is the total pressure in the diffuser channel with passive control of the boundary layer. The object of this research is a diffuser channel with riblets. The mechanism of total pressure reduction due to the presence of longitudinal grooves on the streamlined surface is related to the strengthening of viscous forces acting in the transverse direction caused by them. These forces generate a relatively calm flow inside the riblets, which pushes out the turbulent flow, which causes surface friction, pushing it away from the surface. Thus, the process of generation and growth of elongated wall turbulent formations. In addition, in the presence of riblets, a change in the pressure field in the transverse direction is possible, as well as the creation of a quasi-two-dimensional flow in the immediate vicinity of the wall. In this work, the aim of research to investigate the influence of riblets on total pressure loss in the diffuser channel with the purpose of evaluating the influence of riblets on the change in the nature of the flow and the change in pressure, using numerical modeling. To study the nature of the flow in the diffuser channel, we resolved the following tasks: a diffuser channel was modeled with the following dimensions: length $L=50$ mm, hydraulic diameter at the inlet $X=25$ mm, hydraulic diameter at the outlet $Y=40$ mm, riblets diameter $d=4$ mm, number of riblets $n=4$ and $n=8$. The study was compared with a diffuser with the following dimensions: length $L=50$ mm, diameter at the inlet $X=25$ mm, diameter at the outlet $Y=40$ mm. To research the flow in the diffuser, the method of numerical experiment was chosen. An unstructured calculation grid was used in the diffuser for the research. The calculation of the turbulent gas flow was performed by numerically solving the averaged Navier-Stokes equations. During the numerical simulation of the flow, the Reynolds stress turbulent viscosity model will be used. As a result, using a diffuser with riblets increases the coefficient of hydraulic resistance compared to a smooth diffuser. The resistance reduction mechanism does not work due to the relatively short length of the diffuser and small longitudinal vortices of the riblets scale do not have time to form. There are pressure increasing instead of laminization of the flow and pressure decreasing. Scientific novelty - received new data on the effect of riblets in the diffuser channel on the total pressure loss coefficient. Practical significance - the obtained results can be used to control the boundary layer in diffuser channels (in diffuser compressor grates) to improve their characteristics.

Keywords: diffuser channel; riblets; boundary layer; Computational fluid dynamics.

Юдін Ілля Ігорович – асп. каф. авіаційних двигунів аерокосмічного факультету, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Illia Yudin – PhD student of Department of Aviation Engines, Aerospace Faculty, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: illiayudin98@gmail.com, ORCID: 0009-0001-9934-553X.