

УДК 629.735

DOI: 10.18372/0370-2197.1(82).13486

Ю. Ю. ТЕРЕЩЕНКО, Ю. М. ТЕРЕЩЕНКО, К. В. ДОРОШЕНКО

*Національний авіаційний університет, Київ***МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ НА ПЛАСТИНІ З ВІДСМОКТУВАННЯМ ПОГРАНИЧНОГО ШАРУ**

*При течії газу в каналі при обтіканні тіл різної форми на стінках утворюється пограничний шар, викликаний наявністю сил тертя. Відсмоктування невеликої кількості загальмованого у стінки газу є одним із засобів ламінаризації течії в пограничному шарі і зменшення тертя. У роботі ставиться завдання оцінити вплив форми вхідних кромки дискретних каналів на ефективність відсмоктування пограничного шару на пластині. Поставлена задача вирішувалася методом чисельного моделювання. Розрахунок течії на пластині проводився за допомогою усереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса. Для замикання рівнянь використовувалася модель турбулентної в'язкості SST Менгера. Для урахування пограничного шару розрахункова сітка мала адаптацію. Тип розрахункової сітки - неструктурована. На вході задавалася осьова швидкість 100 м/с. Об'єкт дослідження - пластина довжиною 100 мм. На пластині виконано 15 дискретних каналів для управління пограничним шаром, ширина яких 1 мм, відстань між каналами 3 мм. Для дослідження обрані дві форми каналів: з прямокутними вхідними кромками і з профільованими вхідними кромками. Інтенсивність управління пограничним шаром оцінювалася коефіцієнтом відсмоктування. Першим етапом роботи був розрахунок течії на пластині без використання управління пограничним шаром. В ході наступного етапу роботи були проведені серії газодинамічних розрахунків течії на пластині з використанням відсмоктування пограничного шару при різній інтенсивності. Результати розрахунків показали, що форма вхідної кромки каналів для відсмоктування пограничного шару не істотно впливає на ефективність управління пограничним шаром. При прямокутних вхідних кромках каналів для управління пограничним шаром товщина пограничного шару зменшується на 58...65%, при профільованих вхідних кромках ефективність зростає до 63...70%.*

**Ключові слова:** пограничний шар; сили тертя; пластина; відсмоктування пограничного шару; чисельний експеримент.

**Вступ.** При течії газу в каналі, при обтіканні тіл різної форми на стінках утворюється пограничний шар, який викликається наявністю сил тертя. Виникнення пограничного шару призводить до збільшення гідравлічних втрат.

Управління пограничним шаром дозволяє знизити гідравлічні втрати. Одним із ефективних методів, який відноситься до активних методів, є відсмоктування пограничного шару через спеціальні отвори [1]. Відсмоктування невеликої кількості загальмованою у стінки газу є одним із засобів ламінаризації течії в пограничному шарі і зменшення тертя.

**Аналіз досліджень і публікацій.** В роботах [2-8] показано, що використання відсмоктування пограничного шару дозволяє знизити гідравлічні втрати і зменшити товщину пограничного шару, а також запобігти небажаному відриву пограничного шару.

В роботі [2] теоретично і експериментально досліджується течія в'язкої нестисливої рідини на плоскій пластині з вузькою щілиною при відсмоктуванні. Теоретичне дослідження полягає в чисельному вирішенні рівнянь Нав'є - Стокса. Течія над пластиною розглядається спільно з течією всередині щілин кінце-

вих розмірів. Експериментальна частина полягає у вимірі лазерним анемометром профілів поздовжньої складової швидкості на різних відстанях від щілини в різних режимах відсмоктування і різних умовах в набігаючому потоці. Наводиться порівняння результатів. Автори відзначають гарне узгодження отриманих теоретичних і експериментальних даних.

В роботі [3] розглядається оптимізація закону відсмоктування пограничного шару. У роботі представлено вирішення двох завдань оптимального управління пограничним шаром: ламінаризація з найменшою витратою енергії і запобігання відриву з найменшою витратою енергії. Автор зазначає, що незважаючи на те, що знайдені рішення є наближеними, тим не менш, вони дають правильне уявлення про оптимальний розподіл відсмоктування.

Робота [4] присвячена питанню розвитку збурень у пограничному шарі при щільному відсмоктуванні. В роботі представлені результати дослідження процесу розвитку спочатку синусоїдальних збурень в ламінарному пограничному шарі при наявності відсмоктування газу через вузьку щілину. Визначено умови, при яких щільне відсмоктування як засіб ламінаризації течії стає неефективним.

В роботі [5] детально вивчається вплив відсмоктування пограничного шару на розвиток нового пограничного шару і турбулентні структури в потоці на пластині.

В роботі [6] показано, що дискретне відсмоктування пограничного шару на пластині дозволяє зменшити інтенсивність росту хвиль Толлміна-Шліхтинга.

У роботах [7-8] показана ефективність застосування одночасно вдуву і відсмоктування пограничного шару на пластині [7] і крилі [8].

Ефективність застосування відсмоктування пограничного шару досліджується за допомогою фізичного та чисельного експерименту. Кожен з методів дослідження має свої переваги і недоліки. Перевага чисельного експерименту є можливість проводити дослідження управління пограничним шаром за короткий час при будь-яких початкових і граничних умовах для тіл будь-якої форми. Однак чисельний експеримент доцільно використовувати на перших етапах дослідження. Аналіз літературних джерел з даної проблеми показав, що залишається не до кінця дослідженим питання про вплив форми каналів для здійснення відсмоктування прикордонного шару на пластині.

**Мета роботи.** В роботі ставиться завдання оцінити вплив форми вхідних кромek дискретних каналів на ефективність відсмоктування пограничного шару на пластині.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Поставлена задача вирішувалася методом чисельного моделювання. Розрахунок течії на пластині проводився за допомогою осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса. Для замикання рівнянь використовувалася модель турбулентної в'язкості SST Ментера. Вибір саме цієї моделі турбулентної в'язкості ґрунтується на здатності даної моделі адекватно моделювати процеси в ядрі потоку та біля стінок. Для урахування пограничного шару розрахункова сітка мала адаптацію пограничного шару. Тип розрахункової сітки – неструктурована. Як робоче тіло обране повітря при стандартних атмосферних умовах. На вході задавалася осьова швидкість 100 м/с.

Об'єкт дослідження – пластина довжиною 100мм. На пластині виконано 15 дискретних каналів для управління пограничним шаром, ширина яких 1 мм, відстань між каналами 3 мм. Перший канал розташований в 20мм від вхідного перерізу пластини. Для дослідження обрані дві форми вхідних кромek каналів (рис. 1). Висота каналу 1 мм.

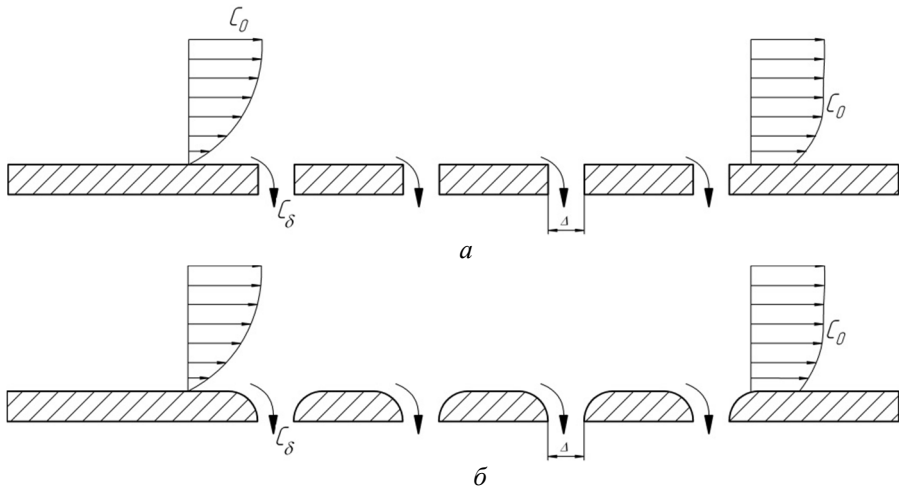


Рис. 1. Схема течії на поверхні пластини з відсмоктуванням пограничного шару через дискретні канали: *а* – канали з прямокутними входними кромками, *б* – канали з профільованими входними кромками

Для оцінки інтенсивності управління пограничним шаром автори пропонують використовувати коефіцієнт відсмоктування у вигляді:

$$C_\delta = \frac{\rho_s \cdot c_s \cdot \sum \Delta}{\rho_0 \cdot c_0 \cdot \delta^*},$$

де  $\delta^*$  – товщина витіснення пограничного шару;  $\rho_0$  – густина газу у ядрі потоку;  $c_0$  – швидкість газу у ядрі потоку;  $\Delta$  – лінійний розмір одиничного отвору для відсмоктування пограничного шару;  $z$  – кількість отворів для відсмоктування пограничного шару на поверхні пластини;  $c_s$  – швидкість газу в каналах для відсмоктування пограничного шару;  $\rho_s$  – густина газу в каналах.

Першим етапом роботи був розрахунок пограничного шару на пластині без використання управління пограничним шаром.

В ході наступного етапу роботи були проведені серії газодинамічних розрахунків течії на пластині з використанням відсмоктування пограничного шару при різній інтенсивності.

На рис. 2-4 показані фрагменти візуалізації течії на пластині без управління пограничним шаром і з відсмоктуванням пограничного шару через дискретні канали з різною формою входних кромки.

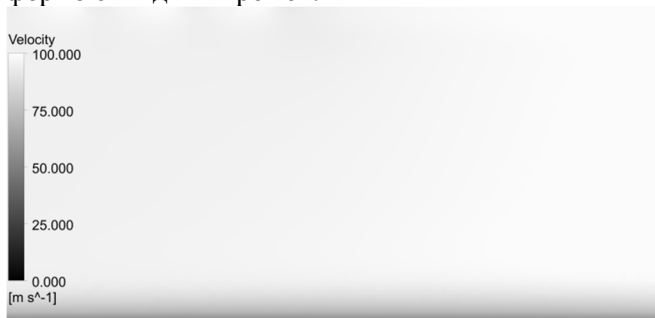


Рис. 2. Пограничний шар на пластині



Рис. 3. Пограничний шар на пластині з використанням відсмоктування (канали з прямокутними вхідними кромками)



Рис. 4. Пограничний шар на пластині з використанням відсмоктування (канали з профільованими вхідними кромками)

Аналіз результатів дослідження показує, що зміна параметрів пограничного шару на поверхні пластини при відсмоктуванні пограничного шару через дискретні канали на пластині практично не залежить від форми вхідної кромки каналів.

За результатами дослідження побудований графік (рис. 5), який показує зміну товщини пограничного шару  $\delta^*$  по довжині пластини при інтенсивності управління пограничним шаром коефіцієнтом відсмоктування  $C_\delta = 1,8$ .

Аналіз графіка на рис.5 показує, що форма вхідної кромки дискретних каналів для відсмоктування пограничного шару не істотно впливає на ефективність управління пограничним шаром. При відсмоктуванні через канали з прямокутними вхідними кромками товщина пограничного шару зменшується на 58...65%, при застосуванні профільованих вхідних кромки - ефективність зростає до 63...70%.

**Висновки.** В роботі представлені результати моделювання течії на пластині з активним управлінням пограничним шаром методом відсмоктування. Проведено аналіз впливу форми вхідних кромки дискретних каналів на ефективність управління пограничним шаром.

Показано, що форма вхідної кромки каналів для відсмоктування пограничного шару не істотно впливає на ефективність управління пограничним шаром. При відсмоктуванні пограничного шару через канали з прямокутними вхідними кромками товщина пограничного шару зменшується на 58...65%, при застосуванні профільованих вхідних кромки - ефективність зростає до 63...70%.

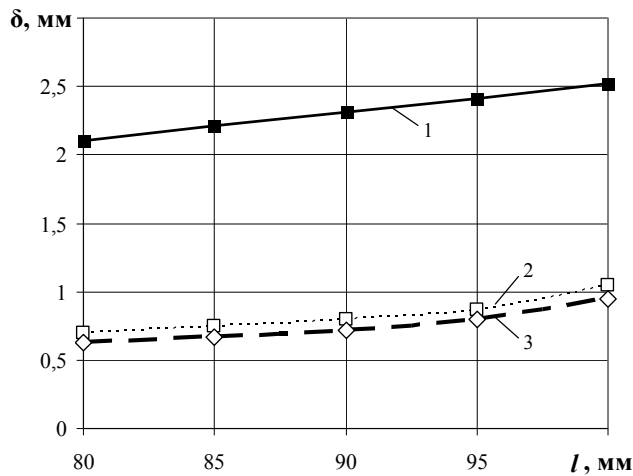


Рис. 5. Зміна товщини пограничного шару  $\delta^*$  по довжині пластини: 1 – пластина без управління пограничним шаром, 2 – пластина з відсмоктуванням пограничного шару через канали з прямокутними входними кромками, 3 – пластина з відсмоктуванням пограничного шару через канали з профільованими входними кромками

#### Список літератури

1. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1969. – 742 с.
2. Козлов В. В. Исследование течения вязкой жидкости в окрестности щели при отсосе / В. В. Козлов, В. Я. Левченко, В. П. Максимов, А. Л. Рудницкий, В. А. Щербаков // Ученые записки ЦАГИ – 1977. – Том VIII. – №1. – С. 130-135.
3. Осовский А.Е. Об оптимизации закона отсоса пограничного слоя / А.Е. Осовский // Ученые записки ЦАГИ. – 1981. – Т. XII. – №6. – С. 112-118.
4. Козлов В.В. Развитие возмущений в пограничном слое при щелевом отсасывании / В.В. Козлов, В.Я. Левченко, В.А. Щербаков // Ученые записки ЦАГИ – 1978. – Том IX. – №2. – С. 99-104.
5. Near-field measurements and development of a new boundary layer over a flat plate with localized suction // Experiments in Fluids. – 2010. – V.48. – №5. – P.747–762. doi: 10.1007/s00348-009-0766-7
6. Sattarzadeh S. S. Spanwise boundary layer modulations using finite discrete suction for transition delay / S. S. Sattarzadeh, J. H. M. Fransson // Experiments in Fluids. – 2017. – V.58. – №14. – 14 p. doi: 10.1007/s00348-017-2301-6
7. Sadri S. Analysis of a laminar boundary layer flow over a flat plate with injection or suction / S. Sadri, M. Babaelahi // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2013. – V. 54. – № 1. – P. 59–67. doi: 10.1134/S0021894413010070
8. Kornilov V.I. Control of turbulent boundary layer on a wing section by combined blowing/suction / V.I. Kornilov // Thermophysics and Aeromechanics. – 2018. – V. 25. – № 2. – P. 155–167. doi: 10.1134/S0869864318020014

Стаття надійшла до редакції 22.02.2019.

**Терещенко Юрій Юрійович** – канд. техн. наук, старший викладач кафедри авіаційних двигунів Національного авіаційного університету.

**Терещенко Юрій Матвійович** – докт. техн. наук, професор, професор кафедри авіаційних двигунів Національного авіаційного університету, Terj@nau.edu.ua

**Дорошенко Катерина Вікторівна** – докт. техн. наук, доцент кафедри авіаційних двигунів Національного авіаційного університету, Doroshenko@nau.edu.ua.

Y. Y. TERESHCHENKO, Y. M. TERESHCHENKO, K. V. DOROSHENKO

### SIMULATION OF FLOWS ON THE PLATE WITH SUCTION OF THE BOUNDARY LAYER

A boundary layer is formed on the walls, caused by the presence of friction forces as gas flows through the channel or when bodies of various shapes flow around. The suction of a small amount of fluid inhibited at the wall is one of the means of laminarizing the flow in the boundary layer and reducing friction. The aim of the work is to evaluate the influence of the shape of the input edges of discrete channels on the suction efficiency of the boundary layer on the plate. The task was solved by the method of numerical simulation. The flow on the plate was calculated using the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations. SST turbulent viscosity model was used to close the equations. The computational grid had an adaptation of the boundary layer to account for the boundary layer. The type of grid was unstructured. The axial speed was set at 100 m/s at the entrance. The object of study was a plate with a length of 100mm. The plate contains 15 channels for controlling the boundary layer, the width of which is 1 mm, the distance between the channels is 3 mm. For the study, two channel shapes were chosen: with rectangular inlet edges and with profiled inlet edges. The intensity of the boundary layer control was estimated by the suction coefficient. The first stage of work was the calculation of the flow on the plate without using boundary layer control. In the course of the next stage, a series of gas-dynamic calculations of the flow on the plate were carried out using the suction of the boundary layer at different intensities. The calculation results showed that the shape of the input edge of the channels for suction of the boundary layer does not have a significant effect on the efficiency of the boundary layer control. The thickness of the boundary layer decreases by 58 ... 65% when the boundary layer is sucked through channels with rectangular inlet edges, the efficiency increases to 63 ... 70% with profiled inlet edges.

**Key words:** boundary layer; frictional forces; plate; suction of the boundary layer; numerical experiment.

#### References

1. Shlihting, G. Teorija pograničnogo sloja [Tekst]/ G. Shlihting. – M.: Nauka, 1969.– 742 s.
2. Kozlov V. V. Issledovanie techenija vjazkoj zhidkosti v okrestnosti shheli pri otose / V. V. Kozlov, V. Ja. Levchenko, V. P. Maksimov, A. L. Rudnickij, V. A. Shherbakov // Uchenye zapiski CAGI – 1977. – Tom VIII. – №1. – C. 130-135.
3. Osovskij A.E. Ob optimizacii zakona otsosa pograničnogo sloja / A.E. Osovskij // Uchenye zapiski CAGI. – 1981. – T. XII. – №6. – C. 112-118.
4. Kozlov V.V. Razvitie vozmushhenij v pograničnom sloe pri shhelevom otsasyvanii / V.V. Kozlov, V.Ja. Levchenko, V.A. Shherbakov // Uchenye zapiski CAGI – 1978. – Tom IX. – №2. – C. 99-104.
5. Near-field measurements and development of a new boundary layer over a flat plate with localized suction / //Experiments in Fluids. – 2010. – V.48. – №5. – P.747–762. doi: 10.1007/s00348-009-0766-7
6. Sattarzadeh S. S. Spanwise boundary layer modulations using finite discrete suction for transition delay / S. S. Sattarzadeh, J. H. M. Fransson // Experiments in Fluids. – 2017. – V.58. – №14. – 14 p. doi: 10.1007/s00348-017-2301-6
7. Sadri S. Analysis of a laminar boundary layer flow over a flat plate with injection or suction / S. Sadri, M. Babaelahi // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2013. – V. 54. – № 1. – P. 59–67. doi: 10.1134/S0021894413010070
8. Kornilov V.I. Control of turbulent boundary layer on a wing section by combined blowing/suction / V.I. Kornilov // Thermophysics and Aeromechanics. – 2018. – V. 25. – № 2. – P. 155–167. doi: 10.1134/S0869864318020014.