Теплофизика и аэромеханика, *2019*, *том 26*, *№ 5*

УДК 532.517:4

Ускорение турбулентного потока в узком облуненном канале и интенсификация отрывного течения при уплотнении однорядных наклоненных овально-траншейных лунок на стенке*

С.А. Исаев[1,2,3], М.С. Грицкевич[1], А.И. Леонтьев[3], О.О. Мильман[4], Д.В. Никущенко[1]

[1]*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет*

[2]*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации*

[3]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

[4]*Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского*

E-mail: isaev3612@yandex.ru

На основе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, замкнутых с помощью модифицированной с учетом кривизны линий тока модели переноса сдвиговых напряжений, обнаружено ускорение турбулентного потока в канале с однорядными наклоненными овально-траншейными лунками, ранее установленное на ламинарном режиме. Показано, что скорость в ядре потока увеличивается до 1,4 раза при уплотнении лунок. Оценено влияние плотности лунок на аномальную интенсификацию отрывного течения на стабилизированном участке канала. Установлено, что абсолютная величина трения в зоне возвратного течения в лунке возрастает до 5,5 раз по сравнению с трением на стенке гладкого канала.

Ключевые слова: наклоненные овально-траншейные лунки, узкий канал, интенсификация течения.

При разработке вихревых технологий для энергетики и микроэлектроники важную роль играют поверхностные вихревые генераторы [1–3]. Наиболее перспективными среди них являются углубления — лунки, размещение которых на омываемых стенках узких каналов не приводит к чрезмерному росту гидравлических потерь по сравнению с выступами. Эффективность поверхностных вихрегенераторов определяется их способностью генерировать интенсивные спиралевидные вихревые структуры [2, 4]. В качестве перспективной формы вихрегенератора предложена овально-траншейная лунка (ОТЛ), наклоненная под углом θ к набегающему потоку [5]. Ее конструкция представляет две разнесенные половины сферической лунки единичного диаметра и глубины Δ, соединенные

* Работа выполнена при поддержке РНФ (гранты № 19-19-00259 (расчеты) и 16-19-10292 (эксперименты)).

© Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Никущенко Д.В., 2019

цилиндрической канавкой длины L. В работах [6, 7] исследовалась интенсификация вихревого турбулентного обтекания воздухом овальных лунок умеренной длины (с L порядка 0–1 в единицах ширины), ориентированных под углом 45° к потоку, в узких каналах. Следует отметить, что характеристики течения в периодических канальных секциях с одной овальной лункой оказались близкими к характеристикам течения на удаленных от входа участках каналов с 15–22 однорядными лунками при задании входного равномерного потока и шага между лунками, равного длине периодической секции.

В работах [8–10] исследовалось турбулентное обтекание водой уединенной овальной лунки, ориентированной под углами 30°–60° в узком канале при фиксированных $\mathrm{Re} = 10^4$ (значение числа Рейнольдса определено по среднемассовой скорости и диаметру базовой сферической лунки), площади пятна и глубине Δ при варьировании отношения длины к ширине λ ($\lambda = L + 1$). Было обнаружено, что с ростом λ гидравлические потери участка канала с лункой увеличиваются и достигают максимума при λ порядка 3. С дальнейшим ростом λ гидравлические потери монотонно снижаются, приближаясь к уровню, характерному для участка канала с базовой сферической лункой. Также с ростом λ происходит интенсификация вторичного течения в ОТЛ, причем максимальная абсолютная величина поперечной скорости, отнесенная к среднемассовой скорости потока в канале, достигает величины 0,85 при λ порядка 6. С возрастанием λ в ОТЛ наблюдалась перестройка течения, связанная с сокращением длины отрывной зоны и увеличением интенсивности возвратного течения в ней. При $\lambda > 4{,}5$ положение отрывной зоны стабилизируется. Было отмечено, что внутри зоны имеет место нетипичное распределение относительного отрицательного трения с максимальной по модулю величиной порядка 1,5. Судя по отрывным течениям за обращенной назад ступенькой или в сферической лунке в узком канале, эта величина, как правило, не превосходит 0,5 (см., например, работы [1, 3]).

В работах [11–13] изучалось ламинарное течение воздуха (при $\mathrm{Re} = 10^3$) в узком канале малой высоты с однорядными наклоненными под углом 45° ОТЛ с варьированием глубины лунки Δ в пределах от 0 до 0,39 в отношении к высоте канала. Было обнаружено явление полуторакратного ускорения максимальной скорости потока при глубинах лунки свыше 0,25.

В настоящей статье анализируются эффекты локального ускорения турбулентного потока в узком облуненном канале и аномальной интенсификации отрывного течения в однорядных наклоненных овально-траншейных лунках при их уплотнении.

Рассматривается турбулентное низкоскоростное течение воздуха в периодической секции длиной 8 в узком плоскопараллельном канале шириной 9 и высотой 1 с нанесенными на нижнюю стенку однорядными наклоненными ОТЛ (рис. 1). Овально-траншейные лунки длиной 7,05, шириной 1,05 и глубиной 0,25 располагаются под углом θ с шагом между центрами H в периодической секции канала, на проточных границах которой, обозначенных как A и B, поставлены периодические граничные условия. Радиус скругления кромки лунки $R = 0{,}21$. Вводится система декартовых координат x, y, z с центром в середине входного сечения на нижней стенке канала. Ось x ориентируется вдоль канала, а ось z — поперек. Все размеры отнесены к высоте канала. Декартовы составляющие скорости u, v, w и

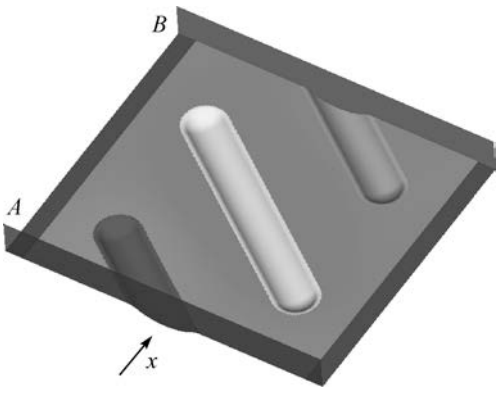

Рис. 1. Периодическая расчетная секция узкого канала с наклонёнными под углом 53° овально-траншейными лунками на нижней стенке, нанесенными с шагом 4; A, B — периодические проточные границы.

число Re, равное 10^4, определяются по среднемассовой скорости потока в канале. Величина H изменяется в пределах от 2 до 8, а θ — от 45 до 65°.

Система осредненных по Рейнольдсу стационарных уравнений Навье-Стокса для несжимаемой вязкой жидкости замыкается с помощью SST-модели, модифицированной с учетом влияния кривизны линий тока в рамках подхода Роди–Лещинера–Исаева [14]. Как и в работах [2, 5–13], исходные уравнения решаются конечно-объемным факторизованным методом с помощью многоблочных вычислительных технологий [15]. На проточных границах выделенной секции с лункой (сечения A, B на рис. 1) ставятся периодические граничные условия, а на стенках — условия прилипания. При решении задачи применяется процедура коррекции давления [15]. Сходимость итераций определяется по достижению максимальных приращений зависимых переменных уровня 10^{-6} и выходу на установление величин относительного трения $(f/f_{\text{pl}})_{\min}$ в отрывной зоне на входе в ОТЛ. Здесь f_{pl} — трение на стенке плоскопараллельного канала в проекциях точек, в которых определяется f, линейные размеры отнесены к высоте канала h (м), а составляющие скорости — к среднемассовой скорости в канале U (м/с), давление — к удвоенному скоростному напору ρU^2; плотность ρ измеряется в кг.

Для обоснования сеточной независимости расчетных результатов сравнивались численные прогнозы, полученные на различных типах сеток для рассматриваемой периодической секции узкого канала с ОТЛ при угле наклона 45°. Рассчитывались два варианта — Mono 1 и Mono 2 — с детальными моноблочными структурированными сетками, содержащими примерно 7,5 млн и 10 млн ячеек. Шаги сеток в продольном и поперечном направлениях на контрольном участке размером 8×8 секции узкого канала равнялись 0,03 и 0,015 соответственно. Вертикальные линии сеток были перпендикулярны верхней плоскости облуненного канала. Построенные сетки имели косоугольный вид, в особенности на склонах лунки; сетки сгущались к стенкам. Пристеночный шаг во всех сеточных вариантах равнялся 10^{-4}. Также был проведен расчет на многоблочных разномасштабных структурированных пересекающихся сетках (MBG). В расчетной области с четырьмя структурированными сетками содержалось порядка 3,2 млн расчетных ячеек.

Приведенные в табл. 1 численные прогнозы, полученные на сетках различного типа при разном количестве расчетных ячеек, оказались сравнительно близкими по экстремальным величинам продольной ($u_{\max}$, $u_{\min}$), вертикальной ($v_{\max}$, $v_{\min}$) и поперечной ($w_{\max}$, $w_{\min}$) составляющих локальной скорости течения, турбулентной энергии $k_{\max}$ и вихревой вязкости $\mu_{t\max}$ ($k_{\max}$ и $\mu_{t\max}$ отнесены к U^2 и ρUh соответственно), а также гидравлическим потерям ζ. В дальнейшем для параметрических расчетов применялась моноблочная сетка Mono1. На рис. 2, 3 и в табл. 2, 3 приведены некоторые из полученных результатов.

В работах [12–13] был установлен эффект локального ускорения в ядре ламинарного воздушного потока в узком облуненном канале. Как видно из рис. 2, зоны локального ускорения наблюдаются в турбулентном течении при Re = 10^4, причем с уплотнением развернутых справа налево (рис. 1) и наклоненных под углом 53° лунок, максимальные

Таблица 1

Анализ сеточной сходимости обтекания наклоненной под углом 45° овально-траншейной лунки при H = 8

Сетка	$u_{\max}$	$u_{\min}$	$v_{\max}$	$v_{\min}$	$w_{\max}$	$w_{\min}$	$10^2 k_{\max}$	$10^3 \mu_{t\max}$	$10^2 \zeta$
Mono1	1,37	–0,53	0,49	-0,34	0,26	-0,96	4,24	4,88	1,77
Mono2	1,37	–0,53	0,51	-0,35	0,29	-0,99	4,69	4,90	1,78
MBG	1,38	–0,58	0,49	–0,37	0,30	-1,00	4,30	4,93	1,78

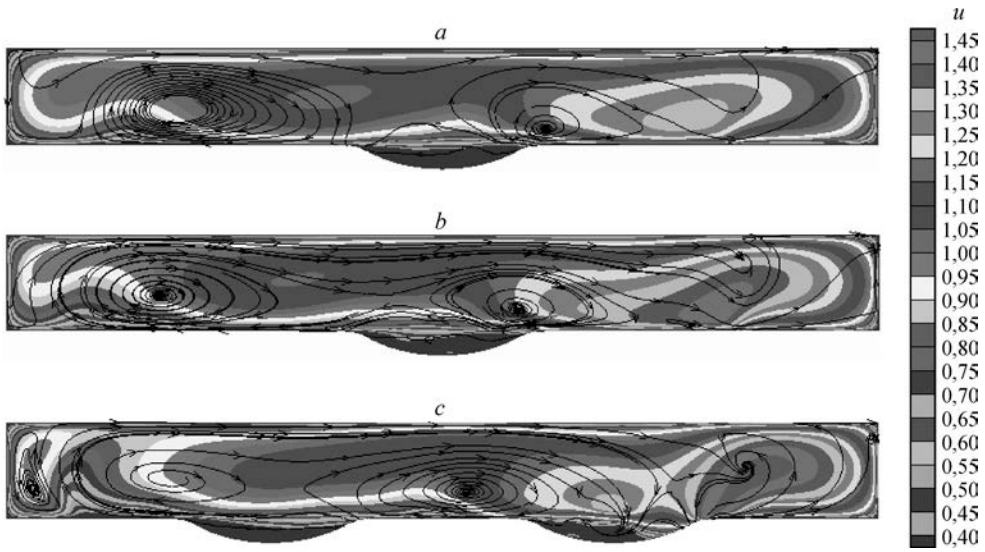

Рис. 2. Сравнение изополей продольной составляющей скорости u в срединном поперечном сечении секции облученного канала при различной плотности лунок. $H = 8$ (*a*), 4 (*b*), 2,667 (*c*).

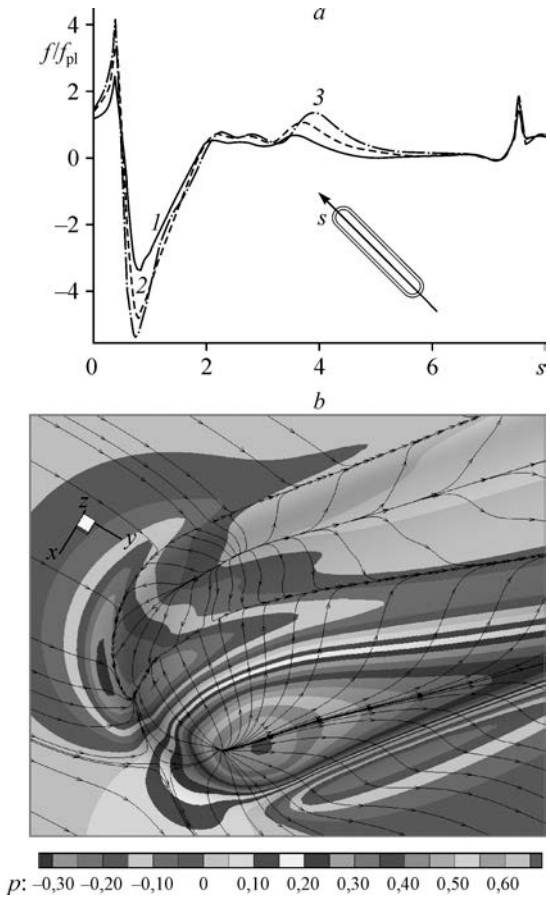

Рис. 3. Сравнение относительного трения в срединном сечении лунки при $\theta = 53°$ и различных H (*a*) и картина отрывного обтекания и поле давления в лунке при $H = 4$ (*b*).
a: $H = 8$ (*1*), 4 (*2*), 2,667 (*3*).

Таблица 2

Экстремальные величины параметров потока, характеристик турбулентности и гидравлического сопротивления в зависимости от шага между лунками при угле наклона 53°

H	u_{max}	u_{min}	v_{max}	v_{min}	w_{max}	w_{min}	$10^2 k_{max}$	$10^3 \mu_{tmax}$	$10^2 \zeta$
8	1,369	-0,600	0,540	-0,381	0,299	-0,990	4,50	4,97	1,78
4	1,502	–0,757	0,695	–0,511	0,412	–1,193	6,03	5,50	2,26
2,667	1,550	–0,794	0,731	-0,575	0,480	-1,242	6,18	5,90	2,70

Таблица 3

Экстремальные величины параметров потока, характеристик турбулентности и гидравлического сопротивления в зависимости от шага между лунками при угле наклона 65°

H	u_{max}	u_{min}	v_{max}	v_{min}	w_{max}	w_{min}	$10^2 k_{max}$	$10^3 \mu_{tmax}$	$10^2 \zeta$
8	1,336	–0,639	0,494	–0,400	0,317	–0,915	4,75	5,50	1,83
4	1,491	–0,811	0,655	–0,537	0,434	–1,145	6,38	7,00	2,41
3,3	1,527	–0,847	0,697	–0,577	0,477	–1,193	6,89	7,20	2,60
2,667	1,579	–0,876	0,743	–0,623	0,531	–1,251	7,19	7,60	2,86
2	1,643	–0,862	0,751	–0,655	0,587	–1,272	7,64	7,70	3,45

скорости потока в зонах растут, а сами зоны смещаются к правой стенке канала. Из таблиц 2 и 3 следует, что скорости в ядре потока возрастают по мере отклонения лунок от направления потока, причем при шаге $H = 2$ и $\theta = 65°$ u_{max} растет примерно до 1,64 по сравнению с u_{max} в гладком канале, равной 1,18.

С уплотнением лунок происходит интенсификация возвратного течения в наклоненных лунках. Как видно из рис. 3*a*, на котором показана зависимость f/f_{pl} от координаты s вдоль срединного сечения ОТЛ, относительное трение во входных частях лунок значительно уменьшается в отрывных зонах. Величина $(f/f_{pl})_{min}$ уменьшается от –3,3 при $H = 8$ до –5,3 при $H = 2{,}667$. При этом дальнейшее практически безотрывное течение в лунке интенсифицируется с уменьшением H, а $(f/f_{pl})_{max}$ достигает 1,3 при $H = 2{,}667$. Как следует из табл. 2, 3, u_{min}, w_{min} значительно растут по абсолютной величине с уменьшением H, причем в гладком канале w_{min} превосходит u_{max}. Таким образом, наблюдается аномальная интенсификация отрывного течения в наклоненных однорядных ОТЛ по мере их уплотнения.

Анализ поля статического давления во входной части ОТЛ (рис. 3*b*) показывает, что между близко расположенными зоной торможения потока на наветренной стороне лунки и областью низкого давления в месте формирования спиралевидного вихря реализуется значительный перепад давления. Этот перепад давления увеличивается по мере уплотнения лунок и является причиной прогрессирующей с уменьшением H интенсификации отрывного течения.

Список литературы

1. **Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P.** Intensification of heat and mass transfer on macro-, micro-, and nanoscales. N.Y.: Begell House, 2016. 630 p.
2. **Леонтьев А.И., Алексеенко С.В., Волчков Э.П. и др.** Вихревые технологии для энергетики. М.: Изд. дом МЭИ, 2017. 349 с.
3. **Терехов В.И., Богатко Т.В., Дьяченко А.Ю., Смульский Я.И., Ярыгина Н.И.** Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 239 с.
4. **Terekhov V.I., Kalinina S.V., Mshvidobadze Yu.M.** A review on heat transfer coefficient and aerodynamic resistance on a surface with a single dimple // J. Enhanced Heat Transfer, 2017. Vol. 24, No. 1–6. P. 411–426.
5. **Исаев С.А., Леонтьев А.И., Митяков А.В., Пышный И.А.** Интенсификация смерчевого турбулентного теплообмена в асимметричных лунках на плоской стенке // Инж.-физ. журн. 2003. Т. 76, № 2. С. 31–34.
6. **Исаев С.А., Леонтьев А.И.** Проблемы моделирования смерчевого теплообмена при турбулентном обтекании рельефа с лунками на стенке узкого канала // Инж.-физич. журн. 2010. Т. 83, № 4. С. 733–742.

7. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Корнев Н.В., Хассель Э., Чудновский Я.П. Интенсификация теплообмена при ламинарном и турбулентном течении в узком канале с однорядными овальными лунками // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, № 3. С. 390–402.

8. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Гульцова М.Е., Попов Ю.А. Перестройка и интенсификация смерчеобразного течения в узком канале при удлинении овальной лунки с фиксированной площадью пятна // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 12. С. 89–96.

9. Isaev S.A., Schelchkov A.V., Leontiev A.I., Gortyshov Yu.F., Baranov P.A., Popov I.A. Tornado-like heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 109. P. 40–62.

10. Isaev S., Leontiev A., Chudnovsky Y., Popov I. Vortex heat transfer enhancement in narrow channels with a single oval-trench dimple oriented at different angles to the flow // J. Enhanced Heat Transfer. 2018. Vol. 25, No. 6. P. 579–604.

11. Исаев С.А., Баранов П.А., Леонтьев А.И., Попов И.А. Интенсификация ламинарного течения в узком микроканале с однорядными наклоненными овально-траншейными лунками // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44, вып. 9. С. 73–80.

12. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Гульцова М.Е. Интенсификация теплообмена при ламинарном вихревом течении воздуха в узком канале с однорядными наклоненными овальными лунками // Инж.-физ. журн. 2018. Т. 91, № 4. С. 1022–1034.

13. Isaev S.A., Leontiev A.I., Milman O.O., Popov I.A., Sudakov A.G. Influence of the depth of single-row oval-trench dimples inclined to laminar air flow on heat transfer enhancement in a narrow micro-channel // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 134. P. 338–358.

14. Isaev S.A. Experience of application of SST-model-2003 with correction on streamline curvature according to Rodi-Leshziner-Isaev approach for (U)RANS calculations of separated and vortex sub- and supersonic flows // AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 2027, Iss. 1. P. 020015-1–020015-7.

15. Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Publ, 2013. 316 с.

Статья поступила в редакцию 24 мая 2019 г.,
после доработки — 3 июня 2019 г.,
принята к публикации 4 июня 2019 г.