

УДК 532.517:4

## АНОМАЛЬНАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ В НАКЛОНЕННЫХ ОДНОРЯДНЫХ ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНЫХ ЛУНКАХ НА СТЕНКЕ УЗКОГО КАНАЛА

© 2019 г. С. А. Исаев<sup>1,2,\*</sup>, М. С. Грицкевич<sup>2</sup>, А. И. Леонтьев<sup>3</sup>, И. А. Попов<sup>1</sup>, А. Г. Судаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – Казанский авиационный институт,  
Республика Татарстан, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,  
г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

\*E-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступило в редакцию 07.11.2018 г.

После доработки 13.12.2018 г.

Принято к публикации 25.12.2018 г.

В длинном плоскопараллельном канале с однорядными наклоненными овално-траншейными лунками на стенке рассматривается периодическая секция с относительной длиной 8 (расстояние между центрами соседних лунок), шириной 9 и высотой 1 с расположенной в центре наклоненной овално-траншейной лункой длиной 7.05, шириной 1.05, глубиной 0.25 при изменении угла наклона от  $1^\circ$  до  $89^\circ$ . Открыта аномальная интенсификация отрывного турбулентного течения воздуха при числе Рейнольдса, равном  $10^4$ , в наклоненной лунке. При угле наклона  $60^\circ$  максимальная абсолютная величина отрицательного трения в срединном продольном сечении более чем в 2.5 раза превосходит трение в плоскопараллельном канале. Раскрыта причина этого явления, связанная с образованием большого перепада давления между близко расположенными зонами торможения и низкого давления во входном полусферическом сегменте лунки.

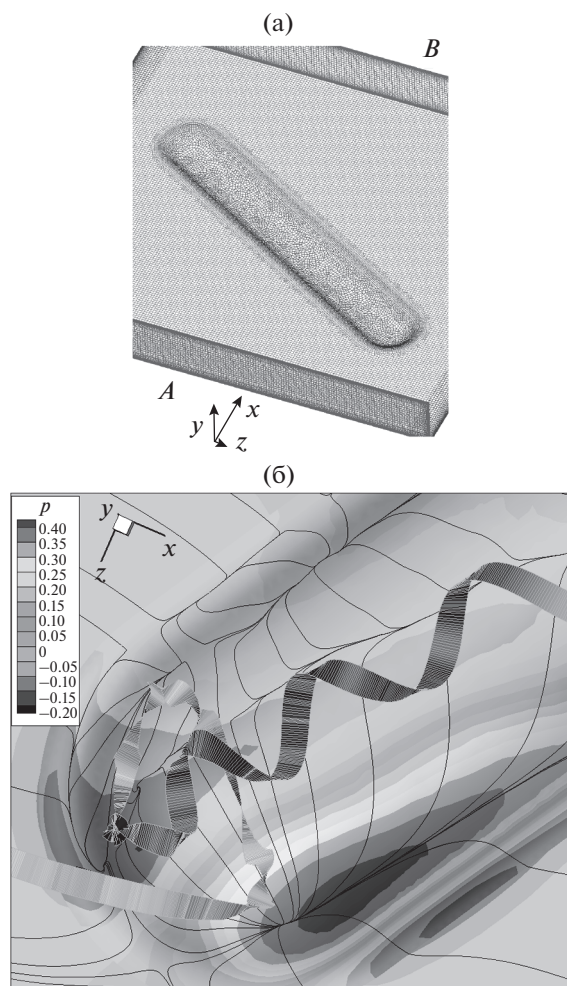
DOI: 10.1134/S0040364419040082

### ВВЕДЕНИЕ

В разрабатываемых вихревых технологиях для энергетики важное значение имеют вихревые генераторы [1, 2]. Особое место среди них занимают углубления – лунки, нанесение которых на омываемые стенки не приводит к значительному росту гидравлических потерь по сравнению с выступами. Эффективность лунок определяется их способностью генерировать интенсивные спиралевидные вихревые структуры [3]. Среди перспективных форм лунок выделяются овално-траншейные лунки (ОТЛ), наклоненные под углом  $\theta$  к набегающему потоку [4]. Их конструкция сочетает в себе две разнесенные половины сферической лунки глубиной  $\Delta$ , соединенные цилиндрической канавкой длиной  $L$ . В [5–7] проанализирована интенсификация вихревого турбулентного обтекания воздухом овалных лунок умеренной длины ( $L \sim 0-1$  в единицах ширины), ориентированных под углом  $45^\circ$  к потоку, в узких каналах. Показано, что характеристики течения в периодических канальных секциях с одной овалной лункой близки к характеристикам течения в удаленных от входа участках каналов с 15–

22 однорядными лунками при задании входного равномерного потока и шага между лунками, равного длине периодической секции.

В [8, 9] исследуется турбулентное обтекание водой уединенной, ориентированной под углом  $45^\circ$  овалной лунки в узком канале при фиксированных числе Рейнольдса  $Re = 10^4$  (определено по среднемаховой скорости и диаметру базовой сферической лунки), площади пятна, глубине лунки и варьировании отношения ее длины к ширине  $\lambda$ . Обнаружено, что при возрастании  $\lambda$  гидравлические потери участка канала с лункой растут с выходом на максимум при  $\lambda \sim 3$ . При дальнейшем увеличении  $\lambda$  гидравлические потери монотонно снижаются, доходя до уровня, близкого к тому, который получается для участка канала со сферической лункой. Показано, что с ростом  $\lambda$  происходит интенсификация вторичного течения в ОТЛ, причем максимальная величина поперечной скорости имеет максимум порядка 0.85 при  $\lambda \sim 6$ . Также с увеличением  $\lambda$  в ОТЛ происходит перестройка течения, связанная с сокращением длины отрывной зоны и возрастанием интенсивности возвратного течения в ней. При



**Рис. 1.** Периодическая расчетная секция узкого канала с наклоненной под углом  $60^\circ$  овально-траншейной лункой на нижней стенке с нанесенной гибридной сеткой (а) и поле статического давления во входной части наклоненной овально-траншейной лунки с нанесенными линиями растекания (б).

$\lambda > 4.5$  положение отрывной зоны стабилизируется. Важно отметить, что внутри зоны наблюдается нетипичное для отрывных течений распределение относительного отрицательного трения с максимальной по модулю величиной порядка 1.5. Обычно (см. [2, 3, 10]), как, например, для отрывного течения за обращенной назад ступенькой, эта величина не превосходит 0.5.

В [11, 12] рассмотрено ламинарное течение воздуха (при  $Re = 10^3$ ) в узком канале с однорядными наклоненными под углом  $45^\circ$  ОТЛ с варьированием глубины лунки в пределах от 0 до 0.39 в отношении к высоте канала. Обнаружено явление полторакратного ускорения максимальной скорости потока при глубинах лунки свыше 0.25.

В данном исследовании акцент делается на численном моделировании явления и выяснении

причин аномальной интенсификации стационарного отрывного турбулентного течения воздуха в однорядных, наклоненных ОТЛ фиксированной формы на стенке узкого канала при варьировании  $\theta$  от  $1^\circ$  до  $89^\circ$ . Крайние положения лунки при  $0^\circ$  и  $90^\circ$  не рассматриваются, так как для них характерны периодические режимы обтекания.

## РАСЧЕТНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

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. 1а). ОТЛ длиной 7.05, шириной 1.05 и глубиной 0.25 располагается в центре секции канала, на проточных границах которой (А и В) поставлены периодические граничные условия. Радиус скругления кромки лунки достаточно велик и равен  $R = 0.21$ . Вводится система декартовых координат  $x, y, z$  с центром в середине входного сечения периодической секции на нижней стенке. Ось  $x$  ориентируется вдоль, а ось  $z$  – поперек канала. Все размеры отнесены к высоте канала, выбранной в качестве характерного линейного масштаба. Декартовы составляющие скорости  $u, v, w$  отнесены к среднemasовой скорости потока в канале, а статическое давление  $p$  – к удвоенному скоростному напору. Число Рейнольдса  $Re = 10^4$ .

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 Родди–Лещинера–Исаева [13]. Как и в [8, 9], исходные уравнения решаются конечно-объемным факторизованным методом с помощью многоблочных вычислительных технологий [6]. На проточных границах выделенной секции с лункой ставятся периодические граничные условия, а на стенках – условия прилипания. При решении задачи применяется процедура коррекции давления [6]. Расчеты стационарного обтекания ОТЛ глубиной 0.25 в периодической секции канала выполнены при изменении угла наклона лунки от  $1^\circ$  до  $89^\circ$ . Сходимость итераций определяется по достижению максимальных приращений зависимых переменных уровня  $10^{-6}$  и выходу на установление величин относительного трения  $(f/f_{pl})_{\min}$  в отрывной зоне на входе в ОТЛ.

Для обоснования сеточной независимости результатов сравниваются численные прогнозы, полученные на различных типах сеток в разных версиях VP2/3 для периодической секции узкого канала с ОТЛ при угле наклона  $45^\circ$ . Специализированный программный комплекс VP2/3, ис-

Сравнение экстремальных гидродинамических характеристик течения, рассчитанных с помощью моноблочной, многоблочной структурированной и гибридной сеток

Сетка	$10^2 \zeta$	$u_{\max}$	$u_{\min}$	$v_{\max}$	$v_{\min}$	$w_{\max}$	$w_{\min}$	$p_{\max}$	$10^3 \mu_{\max}$
ГС	1.772	1.370	-0.494	0.449	-0.333	0.276	-0.967	0.363	4.810
МРСПС	1.785	1.379	-0.585	0.486	-0.373	0.295	-0.997	0.372	4.929
МСС	1.769	1.370	-0.527	0.494	-0.341	0.264	-0.964	0.354	4.880

пользованный в [5–9, 11, 12], основан на многоблочных разномасштабных структурированных пересекающихся сетках (МРСПС). В расчетной области с четырьмя структурированными сетками содержится порядка  $3150 \times 10^3$  расчетных ячеек. В новой версии пакета VP2/3 гибридная сетка (ГС) сочетает фрагменты неструктурированных и структурированных сеток с неструктурированными вставками и строится с помощью разработанной на Python программы Nubmesh [14] (рис. 1а).

Важное достоинство гибридных сеток связано с резким уменьшением количества ячеек неструктурированных сеток. В пределах ОТЛ построена неструктурированная сетка, причем размеры ячеек уменьшаются по мере приближения к скругленной кромке. Внешняя область кромки покрывается структурированной сеткой, соединенной неструктурированной вставкой с прямоугольной сеткой секции узкого канала. В вертикальном направлении гибридная сетка не меняет своей топологии и представляет согласованную с обтекаемой поверхностью криволинейную трехмерную сетку. Общее количество ячеек сетки получается порядка  $3.1 \times 10^6$ . Также рассчитывается вариант с детальной моноблочной структурированной сеткой (МСС), содержащей примерно  $7555 \times 10^3$  ячеек. Шаги сетки в продольном и поперечном направлениях на контрольном участке размером  $8 \times 8$  секции узкого канала равны 0.03. Вертикальные линии сетки перпендикулярны верхней плоской стенке канала. Построенная сетка получается косоугольной, в особенности на склонах лунки. Пристеночный шаг во всех сеточных вариантах равен  $10^{-4}$ .

Показанные в таблице численные прогнозы, полученные на сетках различного типа и для разного количества расчетных ячеек, оказываются 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, статического давления  $p_{\max}$  и вихревой вязкости  $\mu_{\max}$ , а также гидравлическим потерям  $\zeta$ .

Для параметрических расчетов применяется гибридная сетка. Координата  $s$  вводится в срединном продольном сечении наклоненной лунки. Рассчитывается проекция трения  $f$  в продольном срединном сечении наклоненной овально-

траншейной лунки, вдоль которого измеряется  $s$ . Сравняются распределения проекций трения в наклоненной лунке для различных  $\theta$ , отнесенные к соответствующим распределениям проекций трения на стенке гладкого, необлуненного канала  $f/f_{pl}(s)$ .

На рис. 1–3 и в таблице представлены некоторые из полученных результатов.

В центре внимания работы находится зона отрывного течения на входе в наклоненную ОТЛ (рис. 1б). По мере увеличения угла наклона  $\theta$  лунка разворачивается от направления по потоку к направлению поперек потока. Как видно из представленных на рис. 2 распределений  $f/f_{pl}(s)$ , с ростом  $\theta$  отрывная зона сокращается, а возвратное течение в ней интенсифицируется. При  $\theta = 60^\circ$  абсолютная величина  $(f/f_{pl})_{\min}$  возрастает более чем в 2.5 и четырехкратно превосходит аналогичную величину при  $\theta = 1^\circ$ . Величина  $(f/f_{pl})_{\min}$  снижается начиная с  $\theta = 23^\circ$  (рис. 3). Причина такой аномальной интенсификации отрывного течения заключается в гигантском перепаде давления между близко расположенными зоной торможения потока на наветренной сглаженной кромке траншеи и областью низкого давления на подветренном склоне полусферического сегмента в месте генерации спиралевидного вихря (рис. 1б).

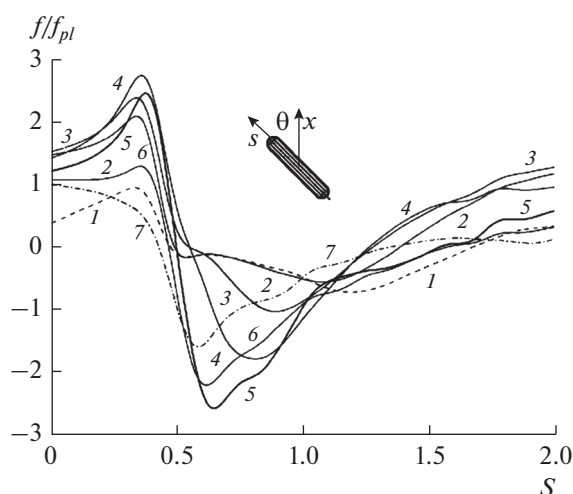
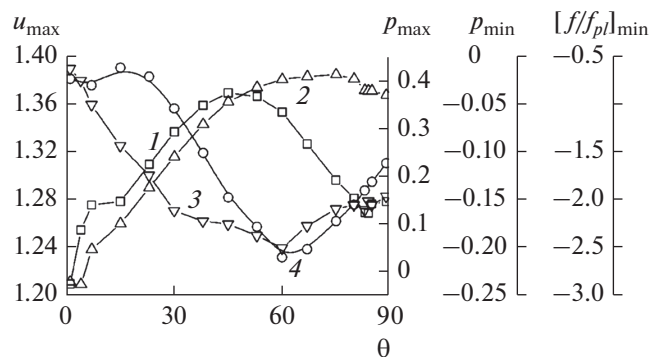


Рис. 2. Влияние  $\theta$  на распределение относительного трения  $f/f_{pl}(s)$  в продольном сечении входной части наклоненной овально-траншейной лунки: 1 –  $\theta = 1^\circ$ , 2 –  $15^\circ$ , 3 –  $30^\circ$ , 4 –  $45^\circ$ , 5 –  $60^\circ$ , 6 –  $75^\circ$ , 7 –  $89^\circ$ .



**Рис. 3.** Влияние  $\theta$  овально-траншейной лунки на распределение экстремальных величин:  $u_{\max}$  (1), давления в зоне торможения на навстречном склоне  $p_{\max}$  (2), давления в зоне генерации спиралевидного вихря на подветренной полусферической части  $p_{\min}$  (3); относительного трения в отрывной зоне входного участка лунки  $(f/f_p)_{\min}$  (4).

При  $\theta = 75^\circ$   $p_{\max}$  достигает 0.42, а  $p_{\min}$  падает до  $-0.21$  при  $\theta = 60^\circ$ . Аналогично полуторакратному ускорению ламинарного потока в канале с наклонными ОТЛ [9, 11] в турбулентном режиме для глубины ОТЛ, равной 0.25, обнаружено менее значительное ускорение потока (примерно в 1.15 раза при  $\theta = 45^\circ$ ) по сравнению с течением в гладком канале.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открыт эффект аномально высокой интенсификации отрывного турбулентного течения воздуха при  $Re = 10^4$  во входной части наклоненной овально-траншейной лунки, расположенной в периодической секции узкого плоскопараллельного канала. Причем при угле наклона  $60^\circ$  максимальная абсолютная величина отрицательного трения в срединном продольном сечении более чем в 2.5 раза превосходит трение в гладком канале. Причина этого явления связана с образованием большого перепада давления между близко расположенными зонами торможения и низкого давления во входном полусферическом сегменте лунки. Открытый важный гидродинамический эффект лежит в основе физического механизма вихревой интенсификации теплообмена в узких каналах с однорядными наклонными овально-траншейными лунками.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №17-08-00148 и №18-01-00210 – валидация) и Российского Научного Фонда (грант №19-19-00259 – обоснование открытия).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиниятуллин А.А., Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б. Теплоотдача при течении воды в трубах с оребренными

ми скрученными ленточными вставками // ТВТ. 2018. Т. 56. № 2. С. 313.

2. Вихревые технологии для энергетики / Под общ. ред. Леонтьева А.И. М.: Изд. дом МЭИ, 2017. 350 с.
3. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб: Судостроение, 2005. 398 с.
4. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Митяков А.В., Пышный И.А. Интенсификация смерчевого турбулентного теплообмена в асимметричных лунках на плоской стенке // ИФЖ. 2003. Т. 76. № 2. С. 31.
5. Исаев С.А., Леонтьев А.И. Проблемы моделирования смерчевого теплообмена при турбулентном обтекании рельефа с лунками на стенке узкого канала // ИФЖ. 2010. Т. 83. № 4. С. 733.
6. Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюкен: LAP LAMBERT Acad. Publ., 2013. 316 с.
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 // ТВТ. 2015. Т. 53. № 3. С. 390.
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 // ПЖТФ. 2015. Т. 41. № 12. С. 89.
9. Isaev S.A., Schelchkov A.V., Leontiev A.I., Gortyshov Yu.F., Baranov P.A., Popov I.A. Numerical Simulation of the Turbulent Air Flow in the Narrow Channel with a Heated Wall and a Spherical Dimple Placed on it for Vortex Heat Transfer Enhancement Depending on the Dimple Depth // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 109. P. 40.
10. Терехов В.И., Богатко Т.В., Дьяченко А.Ю., Смольский Я.И., Ярыгина Н.И. Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 272 с.
11. Исаев С.А., Баранов П.А., Леонтьев А.И., Попов И.А. Интенсификация ламинарного течения в узком микроканале с однорядными наклонными овально-траншейными лунками // ПЖТФ. 2018. Т. 44. № 9. С. 73.
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 наклонными овальными лунками // ИФЖ. 2018. Т. 91. № 4. С. 1022.
13. Исаев С.А., Баранов П.А., Жукова Ю.В., Усачов А.Е., Харченко В.Б. Коррекция модели переноса сдвиговых напряжений с учетом кривизны линий тока при расчете отрывных течений несжимаемой вязкой жидкости // ИФЖ. 2014. Т. 87. № 4. С. 966.
14. Kalinin E.I., Mazo A.B., Isaev S.A. Composite Mesh Generator for CFD Problems // 11th Int. Conf. "Mesh Methods for Boundary-value Problems and Applications". IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 158. 6 p.