

03

Интенсификация ламинарного течения в узком микроканале с однорядными наклоненными овално-траншейными лунками

© С.А. Исаев^{1,2}, П.А. Баранов², А.И. Леонтьев³, И.А. Попов¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — Казанский авиационный институт, Казань, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия

³ Московский государственный технический университет

им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступило в Редакцию 3 октября 2017 г.

С помощью разработанных многоблочных вычислительных технологий при $Re = 10^3$ проведены расчеты полностью развитого ламинарного течения воздуха в плоскопараллельном канале шириной 6 и высотой 1 с нанесенными на стенку однорядными наклоненными овално-траншейными лунками. Рассматривается периодическая секция канала длиной 4 с одной траншейной лункой длиной 4.5, шириной 1, углом наклона к потоку 45° при изменении глубины от 0 до 0.375. Обнаружена интенсификация ламинарного течения в ядре потока в облуненном канале при глубине траншейных лунок свыше 0.25 с увеличением максимальной скорости более чем в 1.5 раза по сравнению с максимальной скоростью потока в гладком канале.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.09.46068.17066

Интенсификация ламинарного течения в каналах и трубах представляет собой сложную проблему. Для ускорения потока требуется увеличивать перепад полного давления, что не всегда возможно. Проблема важна для повышения эффективности теплоэнергетического оборудования. Она связана с интенсификацией теплообмена с помощью поверхностной дискретной шероховатости, включая упорядоченные лунки, размещение в трубах скрученных лент, изменение формы проточного тракта за счет создания периодических конфузоро-

диффузорных секций [1–3]. В последнее десятилетие усилился интерес к микроканалам [4–6], в которых увеличение теплоотдачи вызывается расположением на стенке однорядного пакета сферических лунок. Однако сферические лунки не являются эффективными интенсификаторами, хотя при низких числах Рейнольдса Re отмечается снижение гидравлических потерь в облуненном канале (dimpled channel) по сравнению с таковыми для гладкого плоскопараллельного аналога.

В 2003 г. [7] были предложены овальные лунки, расположенные с наклоном к набегающему потоку под углом θ , с длиной цилиндрической вставки L между двумя разнесенными половинами сферической лунки диаметром d и глубиной Δ . В [8] при турбулентном обтекании пластины с овальной лункой показано, что такие лунки являются более эффективными поверхностными вихрегенераторами, чем их сферические аналоги, а оптимальный угол наклона овальной лунки к потоку составляет 45° . Однорядные пакеты овальных лунок с $L = 0.8$, шириной 1, и глубиной 0.2, нанесенные на стенку плоскопараллельного канала высотой 0.44 и шириной 2.5 с шагом 1.8, рассматриваются в [9] при ламинарном режиме течения с Re , изменяющимся от 100 до 2500 (число Рейнольдса Re определено по ширине лунки и среднemasсовой скорости). Однако овальные лунки умеренной длины не являются рациональными по гидравлическим потерям. Как показано в [10], при уменьшении ширины овальной лунки и сохранении постоянными площади пятна и глубины лунки гидравлические потери в облуненном узком канале при турбулентном течении достигают максимума, после чего снижаются до уровня, практически соответствующего гидравлическим потерям в канале с эквивалентной по площади пятна сферической лункой (в этом случае длина овально-траншейной лунки в 6 раз превышает ширину).

В настоящей работе решается задача об интенсификации ламинарного течения воздуха при фиксированном числе Рейнольдса $Re = 10^3$ в узком канале прямоугольного поперечного сечения шириной 6 и высотой 1 с нанесенным на нижнюю стенку пакетом однорядных овально-траншейных лунок с шагом 4 и наклоном 45° к продольной оси канала. Ширина лунок 1, длина 4.5, радиус скругления кромок 0.025. Глубина лунки Δ изменяется в пределах от 0 до 0.375. Вводится система декартовых координат x, y, z с центром в начале расчетного модуля, ось x которой ориентируется вдоль, а ось z — поперек канала. Все размеры отнесены к высоте канала. Декартовы составляющие скорости

Влияние расчетной сетки на экстремальные величины локальных декартовых составляющих скорости и на коэффициент гидравлических потерь ξ

$N \cdot 10^{-3}$	u_{\max}	u_{\min}	v_{\max}	v_{\min}	w_{\max}	w_{\min}	$\xi \cdot 10^2$
650	-0.136	2.139	-0.201	0.165	-0.572	0.116	3.273
1150	-0.154	2.130	-0.203	0.168	-0.560	0.118	3.250
2500	-0.155	2.135	-0.202	0.167	-0.558	0.118	3.244

u , v , w и число Re определяются по среднemasсовой скорости потока в канале.

Система стационарных уравнений Навье–Стокса для несжимаемой среды решается конечно-объемным факторизованным методом с помощью многоблочных вычислительных технологий, основанных на пересекающихся разномасштабных сетках [11]. На проточных границах выделенного модуля с лункой ставятся периодические граничные условия, а на стенках — условия прилипания. При решении задачи применяется процедура коррекции давления [8,11].

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

Методические расчеты выполнены на многоблочных сетках различного типа и количества ячеек N . Простейшая и наиболее грубая сетка, содержащая порядка 650 тысяч ячеек (рис. 1, *a*), состоит из двух фрагментов: прямоугольной канальной сетки с равномерными шагами (0.1) вдоль и поперек на центральном участке (4×4) периодического модуля, а также криволинейной пристеночной сетки, согласованной с поверхностью лунки высотой 0.2, с измельчением продольного и поперечного шага (0.05). Шаги у стенок равны 0.0001. Уточненная сетка, содержащая порядка 1 миллиона 150 тысяч ячеек, включает дополнительные криволинейные сетки в окрестности кромок и внутри лунки. И наконец, наиболее измельченная сетка с количеством ячеек в 2 миллиона 500 тысяч характеризуется двукратным уменьшением продольных и поперечных максимальных шагов в канальном и пристеночном фрагментах многоблочной сетки.

В таблице сравниваются экстремальные величины параметров течения и гидравлические потери в периодическом модуле, рассчитанные на разных многоблочных сетках. Как следует из таблицы, по мере

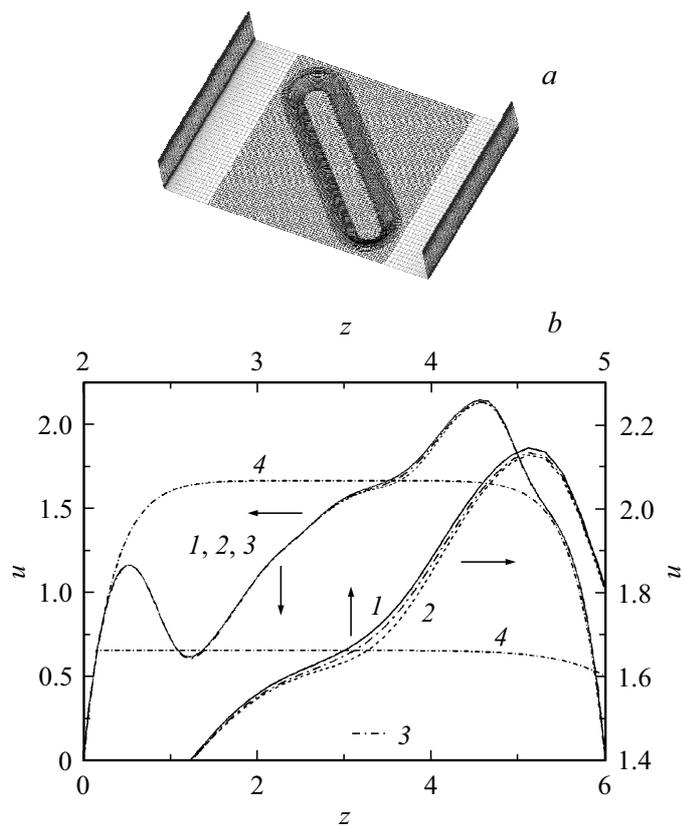


Рис. 1. Многоблочные сетки в периодическом модуле с овально-траншейной лункой глубиной 0.25 (а) и сравнение (в двух масштабах, включая укрупненный) профилей продольной составляющей скорости $u(z)$ в сечениях $x = 1$ (1), 2 (2), 3 (3) для фиксированных $y = 0.35$ и $Re = 10^3$ (b). Кривые 4 соответствуют профилю $u(z)$ плоскопараллельного канала при $y = 0.5$.

измельчения сетки растет прогнозируемая интенсификация возвратного течения, хотя максимальная (по абсолютной величине) скорость вторичного течения монотонно снижается, как и коэффициент гидравлических потерь.

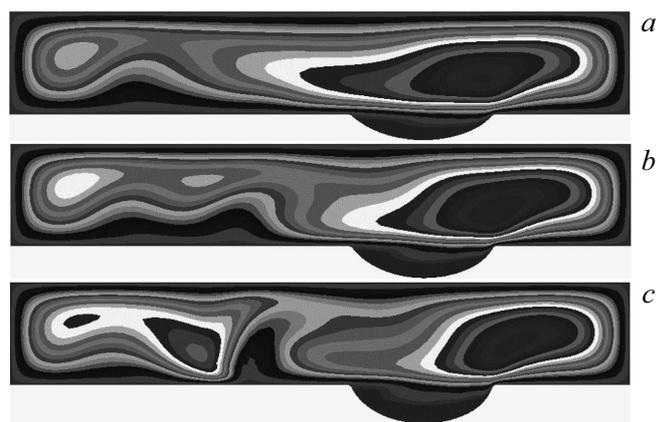


Рис. 2. Картины поперечных полей изолиний продольной скорости u , построенных с шагом 0.1 от 0 до 2.1, при глубинах $\Delta = 0.25$ (*a*), 0.3125 (*b*) и 0.375 (*c*) в срединном поперечном сечении периодического модуля плоскопараллельного канала ($x = 2$).

Как видно из рис. 1, *b*, поле продольной скорости в ядре потока в канале с наклоненной овально-траншейной лункой оказывается сильно неоднородным и практически не меняется с увеличением расстояния от входного сечения периодического модуля. В правой половине канала с лункой возникает зона повышенной продольной составляющей скорости, в 1.5 раза превосходящей максимальную скорость в плоскопараллельном канале. Таким образом, открыт эффект интенсификации ламинарного потока в узком канале с периодическими овально-траншейными лунками умеренной глубины (25% от ширины) с ускорением течения в 1.5 раза по сравнению с гладким каналом (2.15 от среднемассовой скорости). В левой половине канала образуются локальный максимум u , примерно в 1.3 раза уступающий по величине максимальной скорости в гладком плоскопараллельном канале, и локальный минимум u , равный 60% от среднемассовой скорости.

Трансформация полей продольной скорости в срединном поперечном сечении облуненного канала с ростом глубины Δ овально-траншейной лунки на рис. 2 демонстрирует интенсификацию ламинарного течения в формирующихся зонах локальных максимумов скорости,

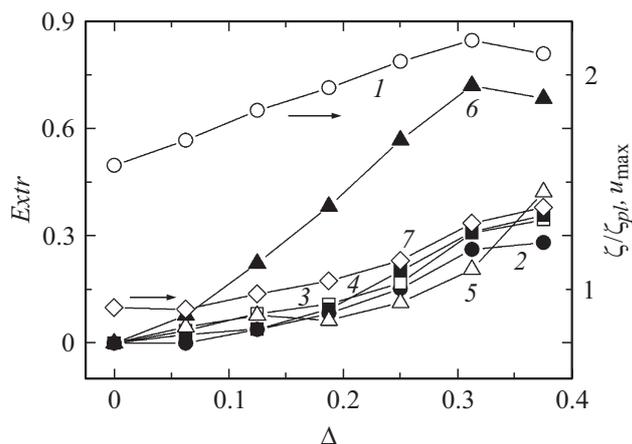


Рис. 3. Зависимости экстремальных величин параметров потока $Extr$ и гидравлических потерь от глубины лунки Δ . 1 — u_{\max} , 2 — $(-u_{\min})$, 3 — v_{\max} , 4 — $(-v_{\min})$, 5 — w_{\max} , 6 — $(-w_{\min})$, 7 — ξ/ξ_{pl} .

а также усиление степени неоднородности в ядре канального потока, в особенности при Δ не менее 0.25 (рис. 2, *a*). Так, при $\Delta = 0.3125$ возникает еще одна область повышенных скоростей в левой половине канала (рис. 2, *b*), а при $\Delta = 0.375$ она приближается к нижней стенке и рядом с ней возникает зона пониженных скоростей (рис. 2, *c*).

Поведение экстремальных параметров потока $Extr$ в облуненном канале с ростом Δ , показанное на рис. 3 (кривые 1–6), согласуется с зависимостью $\xi/\xi_{pl}(\Delta)$ для коэффициента гидравлических потерь облуненного канала ξ , отнесенного к коэффициенту гидравлических потерь в гладком канале ξ_{pl} (кривая 7). Увеличение Δ сопровождается интенсификацией ламинарного течения в канале, в том числе вторичного и возвратного течения, а также приводит к монотонному росту гидравлических потерь. Максимальная величина продольной составляющей скорости течения растет линейно при изменении глубины лунки от 0 до 0.3125. Важно отметить, что наибольшая скорость вторичного течения достигает 70% от среднемассовой скорости, а продольная составляющая скорости — 2.25. Максимальные относительные гидравлические потери в облуненном канале при $\Delta = 0.375$ составляют 1.44.

Интересно провести аналогию между течением в турбомашинах [12,13] и в рассматриваемом плоскопараллельном канале с нанесенными на стенку однорядными овально-траншейными лунками с наклоном по отношению к потоку под углом 45° . Эффект ускорения потока в таком плоскопараллельном канале объясняется воздействием на ламинарное течение решетки утопленных в стенку профилей — овальных удлиненных траншей с глубиной не менее 0.25. Увеличение в 1.5 раза максимальной скорости в ядре потока в облуненном канале по сравнению с максимальной скоростью в гладком канале сочетается с формированием сильно неоднородного течения.

Таким образом, открытое явление интенсификации ламинарного потока в узком плоскопараллельном облуненном канале при $Re = 10^3$ связано с ростом в 1.5 раза максимальной скорости полностью развитого течения при нанесении на стенку однорядных овально-траншейных лунок, наклоненных под углом 45° к продольной оси канала. Лунки имеют длину 4.5, ширину 1 и глубину не менее 0.25 в долях высоты канала.

Работа выполнена при государственной поддержке научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (ведущий ученый — С.А. Исаев, КНИТУ–КАИ, Казань) по гранту Правительства России №14.Z50.31.0003.

Список литературы

- [1] Назмеев Ю.Г. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в дискретно-шероховатых каналах. М.: Энергоатомиздат, 1998. 371 с.
- [2] Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И., Федик И.И., Холпанов Л.П. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах. М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2008. 532 с.
- [3] Вихревые технологии для энергетики / Под общ. ред. акад. А.И. Леонтьева. М.: Изд. дом МЭИ, 2016. 350 с.
- [4] Wei X.J., Joshi Y.K., Ligrani P.M. // J. Electron. Package. 2007. V. 129. N 1. P. 63–70.
- [5] Lee J., Lee K.-S. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2013. V. 64. N 5. P. 444–451.
- [6] Xu M., Lu H., Gong L., Chai J.C., Duan X. // Int. Commun. Heat Mass Transfer. 2016. V. 76. P. 348–357.
- [7] Исаев С.А., Леонтьев А.И., Митяков А.В., Пышный И.А. // Инж.-физ. журн. 2003. Т. 76. № 2. С. 31–34.

- [8] 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.
- [9] Исаев С.А., Леонтьев А.И., Корнев Н.В., Хассель Э., Чудновский Я.П. // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. № 3. С. 390–402.
- [10] Исаев С.А., Леонтьев А.И., Гульцова М.Е., Попов Ю.А. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 12. С. 89–96.
- [11] Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publ., 2013. 316 с.
- [12] Гастелоу Дж. Аэродинамика решеток турбомашин. М.: Мир, 1987. 392 с.
- [13] Степанов Г.Ю. Гидродинамика решеток турбомашин. М.: Физматгиз, 1962. 512 с.