

УДК 533.6.011

Аэрогидродинамические механизмы интенсификации физико-энергетических процессов на структурированных энергоэффективных поверхностях с вихревыми генераторами*

С.А. Исаев^{1,2}

¹*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург*

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

E-mail: isaev3612@yandex.ru

С помощью RANS-подхода установлено явление интерференции струйного потока при его торможении в ходе взаимодействия с наветренной кромкой наклонной канавки на обтекаемой пластине и стенке узкого канала и сгенерированного на входе в канавку смерчеобразного вихря. Экспериментально подтверждены возникающие экстраординарные перепады статического давления между зонами торможения и разрежения. Скорость возвратного течения возрастает до двух раз, а скорость вторичного течения достигает величин, превышающих среднemasсовую скорость. Обоснованы аномальная интенсификация отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на структурированных поверхностях с многократным (до 6–9 раз) увеличением относительного трения и тепловых потоков внутри канавок по сравнению с плоской стенкой, а также ускорение пристенного потока, обусловленного наличием однорядных наклонных канавок в узких каналах (максимальная скорость в ядре структурированного канала возрастает более чем в 1,5 раза по сравнению с максимальной скоростью в плоскопараллельном канале). Выполнено аэродинамическое проектирование новых энергоэффективных поверхностей, структурированных канавками.

Ключевые слова: интенсификация теплообмена, вихри, наклонные канавки, пластина, узкие каналы, численное моделирование, эксперимент.

Введение

В работе [1] рассматривался генезис аномальной интенсификации теплообмена в отрывных течениях при формировании закрученных струйных потоков в наклоненных овально-траншейных лунках. Овально-траншейные лунки (ОТЛ) или канавки образуются из двух половинок сферических лунок, соединенных траншейной вставкой. Указанное явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена было

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению «Передовые цифровые технологии» СПбГМТУ (соглашение от 20.04.2022 № 075-15-2022-312).

установлено численно в однорядных наклонных ОТЛ на нагретой стенке узкого канала для редких [2] и уплотненных [3] компоновок на стабилизированном гидродинамическом участке. Ультравысокие скорости возвратного и вторичного течений, доходящие, а подчас и превосходящие максимальную скорость в плоскопараллельном канале, обуславливаются экстраординарными перепадами давления между зонами торможения струйного входящего в лунку потока на наветренной кромке и разрежения в месте генерации смерчеобразного вихря на входном сферическом сегменте. Внутри ОТЛ образуются области аномально высоких поверхностных градиентов течения и теплообмена, в которых многократно (до 6–9 раз) увеличиваются абсолютные величины относительного трения и тепловых потоков по сравнению с параметрами на плоской стенке. Как было показано в работе [4], в единичных удлиненных ОТЛ, ориентированных под углом 45° к оси узкого канала, пределы возрастания абсолютных величин относительных трения и тепловых потоков существенно меньше (до 1,5–2 раз). Выполненная в настоящей работе компьютерная визуализация отрывного обтекания наклонной канавки демонстрирует формирование в ее входной части торнадоподобного вихря, резко понижающего статическое давление. Возникает перепад давления между зоной торможения входящего в канавку струйного потока и области разрежения в ядре торнадо. Следует отметить, что над входом в наклонную канавку образуется зона высоких скоростей пристенного потока, которые в случае узкого канала с однорядными ОТЛ превышают максимальную скорость для плоскопараллельного канала в 1,5 и более раз [3].

Методическое исследование

Экспериментальное подтверждение установленных численно явлений получено в Институте механики МГУ [5] и в КазНЦ РАН, где на стендах измерялись перепады статического давления в единичных канавках на пластине при варьировании угла наклона ОТЛ θ от 0 до 90° для чисел Рейнольдса набегающего потока $6,7 \cdot 10^4$ и $1,67 \cdot 10^5$ (рис. 1, 2), а также поля скорости ламинарного и турбулентного течений воздуха в узких каналах с двухрядными канавками под углами наклона $\pm 45^\circ$ и $\pm 135^\circ$ (рис. 3а).

На установке А4 Института механики МГУ, подробно описанной в работе [5], на стенке канала размерами $12 \times 1 \times 4$ (высота канала принимается в качестве характерного размера) рассматривается наклоненная под углом 45° остромочная канавка шириной 0,6,

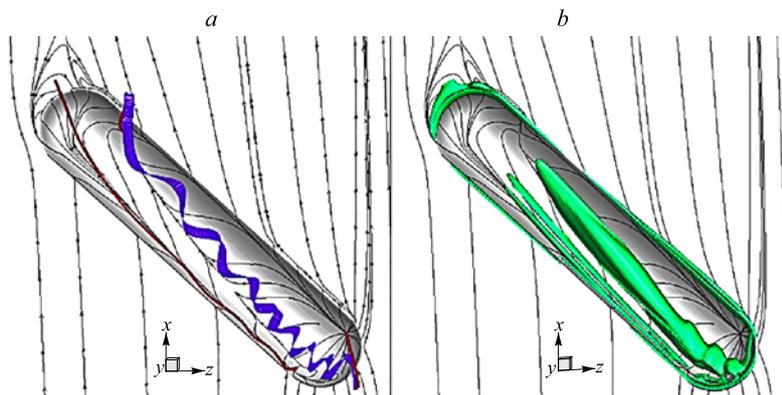


Рис. 1. Самоорганизующиеся струйно-вихревые структуры, визуализированные траекториями меченных частиц и нанесенной картиной растекания воздуха на пластине с наклонной канавкой (а), а также изоповерхностями $\lambda_2 = -1,5$ [6] (b) при $Re = 1,67 \cdot 10^5$.

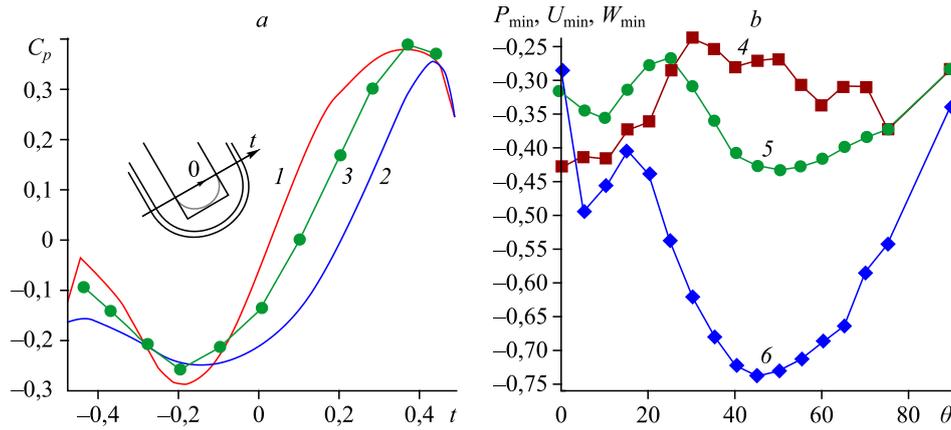
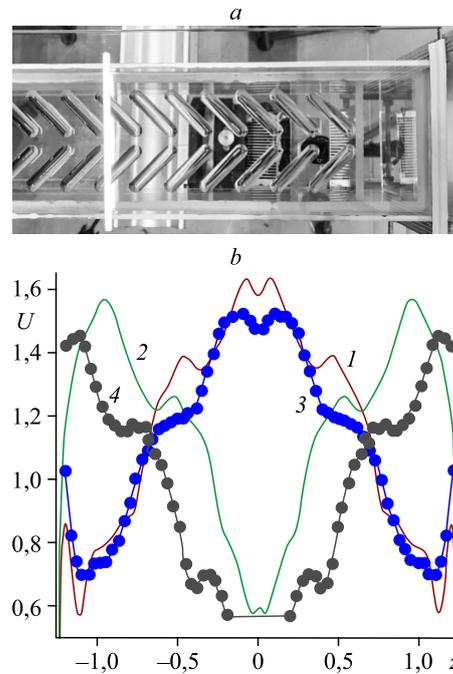


Рис. 2 Сравнение расчетных (1, 2) и экспериментальных (3) распределений коэффициента статического давления C_p в поперечном сечении наклонной канавки в зависимости от относительной координаты t при $Re = 1,67 \cdot 10^5$ (а), а также зависимости P_{\min} (4), U_{\min} (5), W_{\min} (6) от угла наклона канавки θ (в градусах) при $Re = 6,7 \cdot 10^4$ (б).

длиной 3 и глубиной 0,15 (рис. 1, 2а). Число Рейнольдса $Re = 1,67 \cdot 10^5$, а толщина пограничного слоя в районе канавки составляет 0,07 в долях высоты канала. В рабочей части аэродинамической трубы А4 исследуется обтекание пластины с канавкой длиной 6, шириной 1 и глубиной 0,25. Число Рейнольдса внешнего потока составляет $6,7 \cdot 10^4$, а толщина пограничного слоя в районе канавки — 0,16 в долях ширины канавки (рис. 2б). Измеренные коэффициенты статического давления сопоставляются с численными решениями осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS) при замыкании последних с помощью модифицированной модели переноса сдвиговых напряжений (SST), учитывающей влияние кривизны линий тока в рамках подхода Роди–Лещинера–Исаева [2–4] (кривая 1, коды VP2/3), и SST-модели с поправкой Дурбина [7] (кривая 2, коды StarCCM+). На рис. 2б представлены зависимости экстремальных характеристик течения — минимальных величин статического давления P_{\min} , обезразмеренного по удвоенному скоростному напору, скоростей возвратного U_{\min} и вторичного W_{\min} течений, отнесенных к скорости набегающего потока, — от угла наклона ОТЛ θ .

Измерения векторных полей скорости потока проводились в оптически прозрачном канале КазНЦ РАН высотой 1, шириной 10

Рис. 3 Узкий канал с прозрачными стенками и плотно нанесенными двухрядными канавками под углами наклона $\pm 45^\circ$ (V-схема) и $\pm 135^\circ$ (Λ-схема) к набегающему потоку (а), а также сравнение расчетных (1, 2) и экспериментальных (3, 4) профилей $U(z)$ на высоте $y = 0,25$ при Re порядка 4000. 1, 3 — V-схема; 2, 4 — Λ-схема; z и y отнесены к высоте канала.



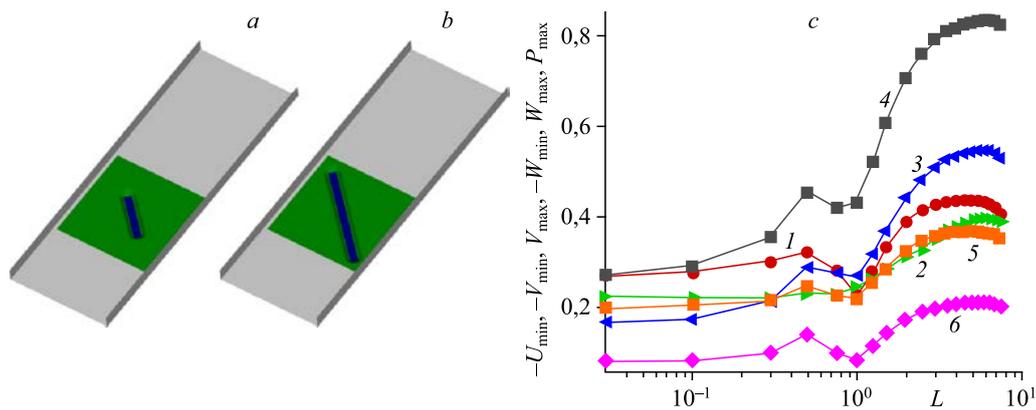


Рис. 4. Узкие каналы (со снятой плоской стенкой) с наклоненными под углом 45° канавками с длинами цилиндрической траншеи $L = 3$ (a), 7 (b) и сравнение зависимостей экстремальных характеристик $-U_{\min}$ (1), $-V_{\min}$ (2), V_{\max} (3), $-W_{\min}$ (4), W_{\max} (5), P_{\max} (6) от L (c).

и длиной 80 с двухрядными 26-ю канавками на стенке при числе Рейнольдса 4300, определенном по скорости равномерного потока на входе и характерному размеру — ширине канавки, равной 10 мм (рис. 3a). Длина острогребных канавок составляла 4,5, глубина — 0,25, шаг между центрами канавок — 2,53 (канавки располагались достаточно плотно). Рассматривались две схемы расположения канавок: V-образные, размещенные под углом $\pm 45^\circ$ к плоскости симметрии канала при развороте канавок к боковым стенкам (в этом случае входные части канавок находятся вблизи плоскости симметрии), и Λ -образные, размещенные под углом $\pm 135^\circ$ к плоскости симметрии и развороте канавок от боковых стенок (в этом случае входные части канавок располагаются вблизи стенок). Установлено, что в формирующемся в конце структурированного канала ядре турбулентного потока над входом в канавки возникают зоны высокой скорости. Максимум продольной скорости U в районе 22-й канавки на высоте $y = 0,25$ составляет порядка 1,5 по отношению к скорости входного потока (рис. 3b).

На рис. 4a, 4b представлен узкий канал высотой 1, шириной 7,5 и длиной 18, на стенке которого на расстоянии 7,5 от входа располагается наклоненная под углом 45° канавка глубиной 0,39, шириной 1, радиусом скругления кромок 0,1 с длиной цилиндрической траншеи L , изменяющейся от 0 до 7,5. Все геометрические размеры отнесены к высоте канала. Число Рейнольдса, определенное по высоте канала и среднемассовой скорости, принято равным 3333. На входе в канал задается профиль полностью развитого турбулентного потока, на выходе — мягкие граничные условия, на стенках — условия прилипания. На рис. 4c показаны зависимости экстремальных параметров возвратного ($-U_{\min}$), нисходящего ($-V_{\min}$), восходящего (V_{\max}) и вторичного потоков ($-W_{\min}$, W_{\max}) и максимального давления (P_{\max}), обезразмеренного по удвоенному скоростному напору, от длины L . Декартовы составляющие скорости отнесены к среднемассовой скорости.

Анализ результатов

Главные результаты проведенных исследований заключаются в расшифровке механизма аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена во входных частях единичных и однорядных наклонных канавок, который связан с образованием экстраординарных перепадов давления между зонами торможения на наветренных склонах

канавки и областями отрицательного давления в ядре самоорганизующихся торнадоподобных вихрей. Эти перепады обуславливают ультравысокие скорости возвратных, вторичных, восходящих и нисходящих течений, а также многократное (от 1,5–2 до 5–7) возрастание относительного трения и тепловых потоков на дне канавки по сравнению с обтеканием плоской стенки. Как видно из картины, полученной с помощью компьютерной визуализации течения, в наклонной канавке на пластине (рис. 1а) происходит интерференция входящего струйного потока, тормозящегося на наветренном склоне, и торнадоподобного вихря в сферическом сегменте. Формирующийся закрученный поток при высоких (порядка 10^5) числах Рейнольдса пристенного течения распространяется практически до конца канавки (рис. 1б). При меньших числах Re для пакетных канавок спиралеобразный вихрь выходит из канавки, не доходя до ее конца. Следует указать, что обнаруженные при численном моделировании перепады статического давления подтверждены измерениями статического давления на дренированных моделях наклонной канавки (рис. 2а), причем численные прогнозы получены с помощью различных расчетных кодов (специализированного VP2/3 [2–4] и коммерческого StarCCM+) [7]. Экстраординарные величины перепадов давления на гладкой криволинейной поверхности входной части канавки сопоставимы с перепадами давления между критическими точками при обтекании затупленных тел, таких как шар или цилиндр. Важно также отметить формирование зоны низкого отрицательного давления перед входом в наклонную канавку, создающей благоприятные условия для попадающего в канавку потока.

Заключение

Представленные выводы сделаны на основе обобщения результатов анализа численных и экспериментальных исследований аномальной интенсификации отрывных течений и теплообмена в наклонных канавках, в том числе содержащихся в данной работе.

1. Угол наклона канавки θ по отношению к набегающему потоку играет кардинально важную роль в явлении аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в канавках, а также ускорения пристенного потока над структурированной стенкой. Как видно из рис. 2б, диапазон углов наклона канавки θ на пластине, при которых реализуются значительные экстремальные скорости возвратного и вторичного течений, составляет от 30 до 75° и согласуется с диапазоном углов наклона однорядных канавок на стабилизированном участке узкого канала с редким расположением канавок.

2. Установлена длина L траншейной части наклонной канавки, при которой в последней возникает устойчивое явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена. Как видно из рис. 4с на примере обтекания наклоненной под углом 45° единичной канавки, расположенной на стенке узкого канала, такая длина превышает 3. В длинных канавках отмечается высокая интенсивность возвратного и вторичного течений во входной части наклонной канавки на стенке узкого канала на стабилизированном участке. Экстремальные скорости здесь сравнимы с максимальной скоростью потока в плоскопараллельном канале.

3. Глубина наклонной канавки, как и глубина сферических и овальных лунок, является важной характеристикой дискретной шероховатости структурированной поверхности, определяющей ее теплогидравлическую эффективность. Рациональная величина глубины лежит в диапазоне 0,25–0,39 от характерного размера — ширины канавки.

4. Уплотнение однорядного пакета наклонных канавок способствует усилению аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в канавках, а также ускорению потока в ядре канала со структурированной стенкой. Рекомендуемое расстояние

между центрами канавок в плотном однорядном ряду составляет величину порядка 2,5 в долях ширины канавки. По мере уплотнения пакета канавок на стенке узкого канала при $Re = 10^4$ увеличивается перепад статического давления в наклоненной под углом 65° канавке, достигая величины 1,2 в долях удвоенного скоростного напора [3]. Тепловая эффективность периодической секции канала при этом превышает 2, а теплогидравлическая эффективность, оцененная с учетом коэффициента гидравлических потерь в степени $(-1/3)$, равняется величине порядка 1,6.

5. Установленные явления характерны также для начального гидродинамического участка течения около пластины и стенки канала с одно- и многорядными наклонными канавками, причем здесь наблюдается мультипликативный эффект усиления интенсивности пристенного и отрывного течений, а также теплообмена в канавке по мере ее удаления от начала структурированного участка. Как видно из рис. 3b, для двухрядного плотного пакета из 26-наклонных канавок равномерный входной профиль скорости трансформируется в конце канала (в окрестности 22-й канавки) в сдвиговой профиль с локальным максимумом в центре канала в случае V-образной схемы расположения канавок и приобретает два локальных максимума у стенок в случае Λ -образной схемы. Максимумы продольной скорости соответствуют входным участкам канавок и составляют величину порядка 1,5.

6. В работе обоснована приемлемость RANS-подхода с модифицированной SST-моделью, учитывающей влияние кривизны линий тока по Роди – Лещинеру – Исаеву, для расчета рассматриваемых турбулентных отрывных течений с самоорганизующимися в наклонных канавках интенсивными торнадоподобными вихрями. Получено хорошее согласование результатов измерений статического давления в канавках и составляющих скорости в ядре потока в узком канале с двухрядными канавками (рис. 2 и 3) с данными численных прогнозов. Проведены, в том числе в [7], систематические исследования по влиянию расчетных сеток, моделей турбулентности и кодов на точность предсказания локальных и интегральных характеристик течения и теплообмена.

Список литературы

1. Исаев С.А. Генезис аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на структурированных поверхностях // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2022. № 5. С. 13–24.
2. Isaev S., Gritckevich M., Leontiev A., Popov I. Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall // Acta Astronautica. 2019. Vol. 163 (Part. A). P. 202–207.
3. Isaev S.A., Gritckevich M.S., Leontiev A.I., Milman O.O., Nikushchenko D.V. NT Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2019. Vol. 145. P. 118737-1–118737-13.
4. Isaev S.A., Schelchikov 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 // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2017. Vol. 109. P. 40–62.
5. Зубин М.А., Зубков А.Ф. Структура отрывного обтекания цилиндрической каверны на стенке плоского канала // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2022. № 1. С. 81–89.
6. Dong Y., Yan Y., Liu C. New visualization method for vortex structure in turbulence by λ_2 and vortex filaments // Applied Mathematical Modelling. Vol. 40, No. 1. P. 500–509.
7. Исаев С.А., Чулюнин А.Ю., Никущенко Д.В., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Анализ аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена на стабилизированном участке узкого канала с однорядными наклонными овально-траншейными лунками при использовании различных сеток и моделей турбулентности // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 1. С. 116–125.

*Статья поступила в редакцию 16 июня 2022 г.,
после доработки — 18 ноября 2022 г.,
принята к публикации 8 декабря 2022 г.*