

03.1

## Интенсификация теплообмена в наклонной канавке типа бумеранг на нагретой стенке канала при ориентированной по потоку концевой части

© С.А. Исаев<sup>1,2</sup>, Д.В. Никущенко<sup>1</sup>, И.А. Попов<sup>3</sup>, А.А. Миронов<sup>3</sup>, А.А. Ключ<sup>2</sup>,  
А.Г. Судаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева— КАИ, Казань, Россия  
E-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступило в Редакцию 6 мая 2024 г.

В окончательной редакции 25 июня 2024 г.

Принято к публикации 25 июня 2024 г.

Аномальная интенсификация отрывного турбулентного течения и теплообмена в наклонных прямолинейных канавках на стенке канала и пластины характеризуется ослаблением вихревых структур и угнетением теплообмена в концевой части канавки. Установлено, что излом концевой участка канавки с ориентацией по потоку в канале при его оптимальной относительной длине приводит к проникновению интенсивного закрученного потока в концевую зону канавки и интенсифицирует теплообмен в ней. Относительная теплоотдача от поверхности внутри такой канавки типа бумеранг возрастает в 1.2 раза по сравнению со случаем прямой наклонной канавки.

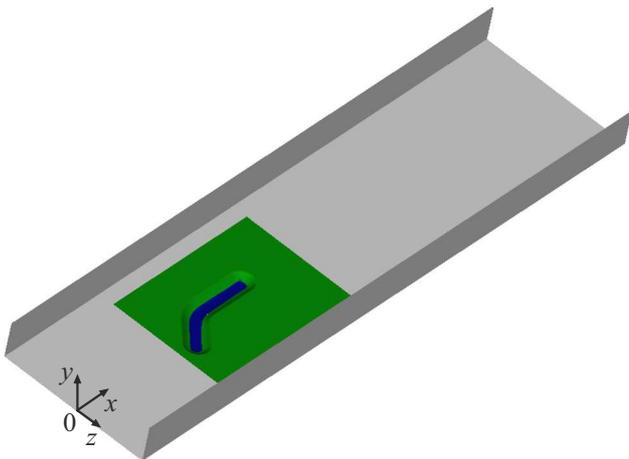
**Ключевые слова:** отрывное течение, узкий канал, наклонная канавка типа бумеранг, интенсификация, численное моделирование.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.20.58932.19982

Многообразие поверхностных вихрегенераторов в луночных технологиях показано в обзоре [1]. Лунки представляются в качестве антиподов выступов как элементы дискретной шероховатости структурированных поверхностей, отличающихся кардинально меньшими гидравлическими потерями. Стремление уменьшить гидравлические потери структурированных поверхностей привело к профилированию лунок, прежде всего к сглаживанию их кромок, а также к использованию несимметричных форм лунок и попарному их соединению, например, в виде V-образных конфигураций. Прежде всего следует отметить часто встречающиеся в литературных источниках каплевидные лунки, ориентированные по потоку и против потока (см., например, [2]), круговые асимметричные лунки со смещением точки с наибольшей глубиной на дне в направлении по потоку и против него [3]. Интерес к генерации интенсивных вихревых структур в лунках обусловил разработку V-образных лунок [4]. Широкий спектр рассмотренных симметричных и несимметричных лунок объединяет одно присущее им свойство: они довольно компактны и имеют умеренные удлинения. Интересно подчеркнуть, что при обтекании упорядоченных систем таких компактных шероховатостей внутри них формируются отрывные зоны, и теплообмен оказывается существенно ослабленным [5].

При турбулентном обтекании наклонных канавок — удлиненных овально-траншейных лунок — в однорядном пакете на нагретой стенке узкого канала на стаби-

лизированном гидродинамическом участке обнаружена аномальная для отрывных течений интенсификация теплообмена внутри канавки [6]. Минимум отрицательного трения и максимум числа Нуссельта в зоне возвратных токов многократно (для плотного пакета в 5–7 раз) по абсолютной величине превосходят величины трения и числа Нуссельта в плоскопараллельном канале. На структурированной стенке канала с наклонными канавками значительный рост теплоотдачи происходит в отрывных зонах течения внутри канавок. Механизм аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках связан с возникновением сосредоточенных на узких входных участках экстраординарных перепадов давления [7,8], причем области отрицательного давления на входных сферических сегментах обусловлены формированием торнадоподобных структур. Анализ рассчитанного и измеренного распределения относительного числа Нуссельта в срединном сечении единичной наклонной канавки на пластине [9] показал его двукратное увеличение по сравнению со случаем плоской пластины во входной части и довольно резкое снижение на концевом участке. Угнетение теплообмена также отмечается в концевых участках канавок в однорядном пакете на стенке канала [6]. Причина резкого падения относительной теплоотдачи связывается со снижением интенсивности вихревого течения в концевой части, обусловленным ранним выходом спиралевидного вихря из наклонной канавки.



**Рис. 1.** Узкий канал с канавкой на его нагретой стенке с заданной декартовой системой координат  $x, y, z$  с началом в середине входного сечения канала.  $\xi = 0.4$ . Верхняя стенка канала снята.

Влияние отношения длины наклонного участка к суммарной длине канавки типа бумеранг на относительную теплоотдачу от участка, ограниченного контуром пятна канавки, а также на относительные гидравлические потери участка канала между сечениями начала и конца канавки и теплогидравлическую эффективность поверхности канавки

$\xi$	$Nu_m/Nu_{m\,pl}$	$\xi/\xi_{pl}$	$(Nu_m/Nu_{m\,pl})/(\xi/\xi_{pl})^{1/3}$
0	0.96	1.07	0.94
0.4	1.29	1.20	1.215
1	1.07	1.16	1.015

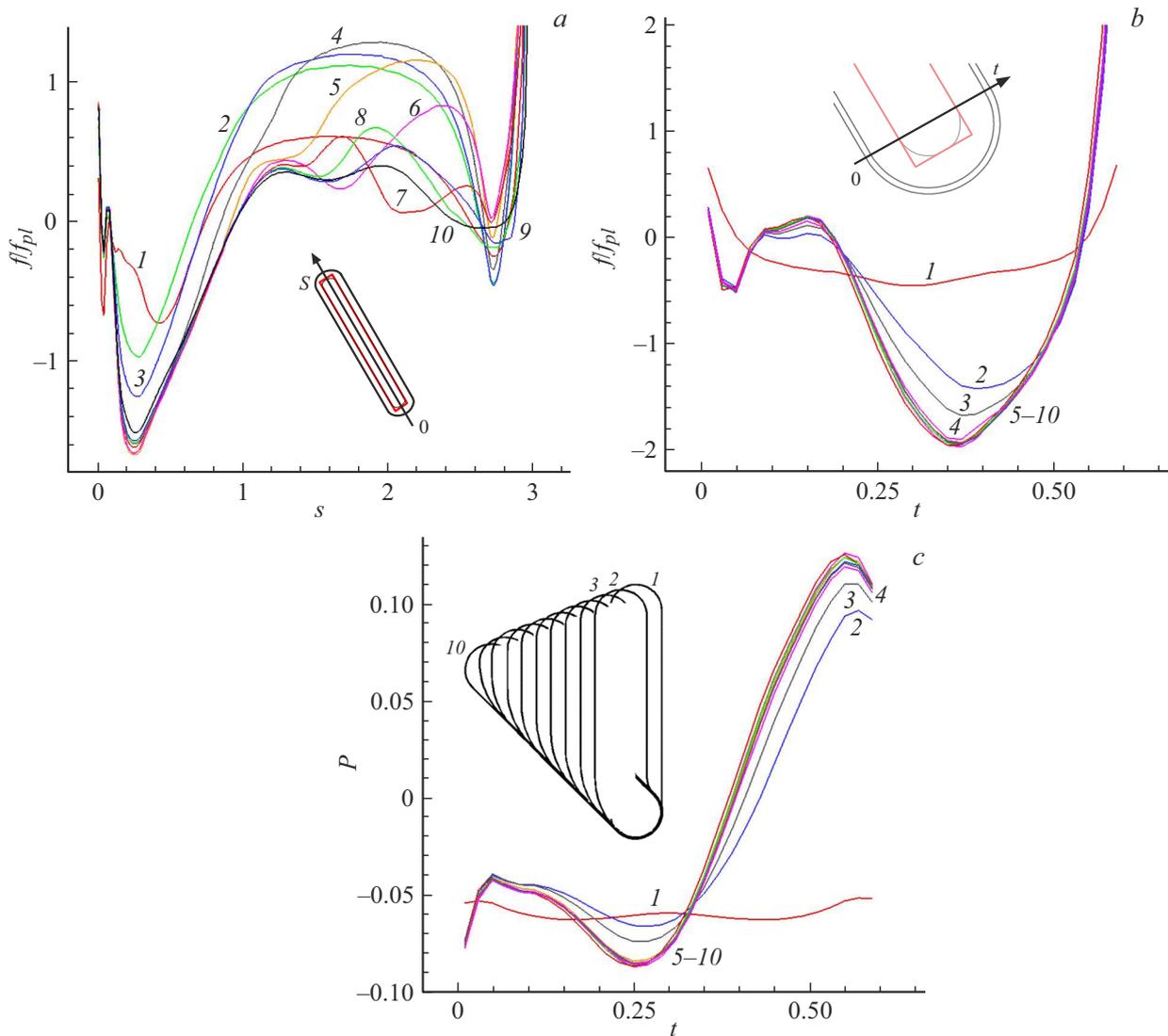
В настоящей работе предлагается осуществить профилирование канавки типа бумеранг, изменив ее траекторию и придав концевой части направление по потоку (рис. 1). Как и в [10,11], единичная канавка с наклоном входной части под углом  $45^\circ$  располагается на стенке канала. Относительная длина входного участка  $\xi$  варьируется от нуля до единицы, т.е. ориентированная по потоку канавка трансформируется в наклонную прямолинейную канавку. Высота канала  $H = 0.05$  m принимается в качестве характерного размера. Безразмерная ширина канала равна 2, а длина — 12. Канавка представляет собой две половинки сферической лунки, соединенные траншейной вставкой, и имеет ширину 0.6, глубину 0.15 и общую длину 3. Ее входной участок с относительной переменной длиной  $\xi$  наклонен под углом  $45^\circ$ , а концевой участок направлен по потоку. Радиус скругления кромки 0.02. Канавка располагается в середине канала на расстоянии 6 от входного сечения. Число Рейнольдса, определенное по скорости равномерного потока на входе и высоте канала, задается равным  $1.65 \cdot 10^4$ . Толщина пограничного слоя на входе в рабочий участок канала имеет величину порядка 0.1. На стенке безразмерные величины  $x$ -составляющей напряжения трения  $f$  и дав-

ления  $P$  определяются по характерной скорости, в качестве которой выбирается скорость равномерного потока на входе. Степень турбулентности во входном сечении выбирается равной 0.5%, а масштаб турбулентности принимается равным характерному размеру  $H$ . На стенках задается условие прилипания, а на выходной границе — условия продолжения решения. На входе в канал воздушный поток изотермический с температурой  $T_{ref} = 293$  К. Нижняя омываемая стенка канала с канавкой нагревается, причем подводимый постоянный тепловой поток  $q$  приводится к безразмерному виду с помощью формулы  $q^* = q/[\lambda \cdot Pr \cdot Re \cdot T_{ref}/H]$  и принимается равным  $3.4 \cdot 10^{-5}$ . Здесь  $\lambda$  — теплопроводность воздуха,  $Pr = 0.7$ . Боковые стенки канала адиабатические, верхняя стенка изотермическая с температурой  $T_{ref}$ , принятой в качестве масштаба обезразмеривания. На выходе из канала температура  $T$  подчиняется мягким граничным условиям. Число Нуссельта  $Nu$  определяется по градиенту температуры на стенке и перепаду между температурой стенки и среднemasсовой температурой в соответствующем поперечном сечении канала.

Конвективный теплообмен при турбулентном низкоскоростном течении в канале с размещенной на нагретой стенке наклонной канавкой типа бумеранг рассчитывается на основе записанных для несжимаемой жидкости осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, замкнутых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений в версии Ментера, и энергии [6–9]. Система исходных стационарных уравнений в линеаризованной форме решается с использованием многоблочных вычислительных технологий и разномасштабных структурированных сеток с их частичным пересечением. Многоблочная расчетная сетка, состоящая из четырех фрагментарных сеток, содержит порядка  $4 \cdot 10^6$  ячеек. Пристеночный шаг равен  $10^{-5}$ . Численное моделирование проводилось так же, как в работе [11].

Сравнение распределений относительного трения  $f/f_{pl}$  и статического давления  $P$ , обезразмеренного по удвоенному скоростному напору, в связанной системе координат  $s, t$  проводится на рис. 2 в срединном продольном и входном поперечном сечениях канавки при варьировании отношения длины наклонного участка к общей длине канавки  $\xi$  от нуля до единицы. Характеристики с индексом  $pl$  берутся в точках плоскопараллельного канала, соответствующих проекциям криволинейной стенки канала с канавкой. Входное поперечное сечение канавки является сечением стыковки сферического сегмента и траншейной вставки.

Динамика изменения относительного трения с ростом  $\xi$  имеет важное значение для анализа интенсификации отрывного течения и теплообмена в канавке типа бумеранг. С увеличением длины входной наклонной части канавки возрастает интенсивность возвратных токов в срединном сечении (рис. 2, а), причем довольно быстро (при  $\xi = 0.4$ ) достигается минимальное значение  $f/f_{pl}$  порядка  $-1.8$ , многократно превосходящее по модулю

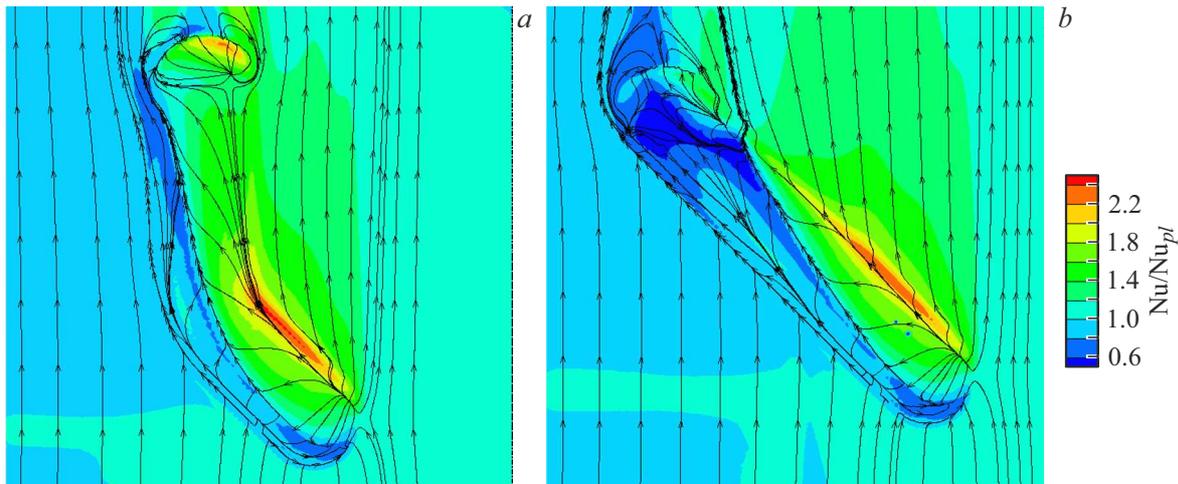


**Рис. 2.** Распределения относительного трения  $f/f_{pl}$  (a, b) и давления  $P$  (c) в срединном (a) и характерном входном (b, c) сечениях поверхности канавки при переменном отношении длины наклонного участка к длине канавки:  $\xi = 0$  (1), 0.15 (2), 0.2 (3), 0.3 (4), 0.4 (5), 0.5 (6), 0.6 (7), 0.7 (8), 0.8 (9) и 1 (10). На вставках к частям a, b показана ориентация осей связанной системы координат  $s, t$ , на вставке к части c представлена эволюция контуров канавки типа бумеранг с изменением  $\xi$ .

$(f/f_{pl})_{\min}$  для канавки вдоль потока. Интересно отметить, что распределения  $f/f_{pl}(s)$  во входной части при  $\xi > 0.3$  практически совпадают, т.е. происходит стабилизация возвратного течения в головной части. Важно подчеркнуть, что при относительной длине наклонного участка  $\xi = 0.3$  максимум  $f/f_{pl}$  достигается на концевой, ориентированной по потоку части канавки и превышает на 30% относительное трение на плоской стенке. С ростом  $\xi$  максимум  $f/f_{pl}$  убывает примерно до 0.25 для  $\xi = 0.6$ , причем при этом в середине канавки образуется локальный максимум  $f/f_{pl} = 0.6$ . С дальнейшим увеличением  $\xi$  этот максимум смещается дальше от центра с некоторым повышением (0.7 при  $\xi = 0.7$ ) и далее уменьшается по величине (0.5 при  $\xi = 0.8$  и 0.4 при  $\xi = 1$ ). В конце канавки наблюдается узкая отрывная

зона с наименьшей величиной  $(f/f_{pl})_{\min} = -0.45$  при  $\xi = 0.3$ . С дальнейшим ростом  $\xi$  сначала этот минимум приближается к нулю и даже становится положительным при  $\xi = 0.6$ . А при дальнейшем увеличении  $\xi$  отрывная зона в конце канавки расширяется, но ее интенсивность для прямой канавки уменьшается. Распределения относительного трения и давления в характерном поперечном сечении входной части канавки с ростом  $\xi$  свыше 0.3 практически совпадают. Величина  $(f/f_{pl})_{\min}$  достигает  $-2$  ближе к наветренному склону, а перепад давления достигает 0.21, причем  $P_{\min} = -0.08$ .

В таблице представлены тепловая эффективность  $Nu_m/Nu_{m,pl}$  криволинейной поверхности, ограниченной контуром канавки, относительное гидравлическое сопротивление участка канала между сечениями начала



**Рис. 3.** Сравнение полей относительных чисел Нуссельта  $Nu/Nu_{pl}$  с нанесенными картинками растекания на нагретой поверхности канала с наклонными канавками типа бумеранг с изломом траектории для  $\xi = 0.4$  (a) и постоянным наклоном (b).

(входа) и конца канавки  $\xi/\xi_{pl}$ , а также его теплогидравлическая эффективность. При оптимальной относительной длине  $\xi = 0.4$  величина  $Nu_m/Nu_{m,pl}$  кардинально превосходит тепловую эффективность прямой канавки по потоку и значительно выше (в 1.2 раза), чем в случае наклонной прямой канавки. Важно отметить, что при этом рост относительных гидравлических потерь оказался ниже увеличения тепловой эффективности (1.2 против 1.29). Также интересно, что теплогидравлическая эффективность прямых канавок получается низкой, в то время как при оптимальной длине канавки типа бумеранг она довольно высока и равна 1.215.

Причина высокой тепловой и теплогидравлической эффективности канавки с  $\xi = 0.4$  раскрывается на рис. 3. В случае прямой канавки спиралевидный вихрь, организованный внутри канавки, выходит из нее, не доходя до конца. Излом траектории канавки при оптимальной длине наклонного участка позволяет удержать закрученный поток в канавке вплоть до ее конца. Таким образом, при  $\xi = 0.4$  достигается максимум теплосъема с внутренней поверхности канавки (см. таблицу) и максимум трения в концевой части также существенно превышает трение на стенке плоскопараллельного канала.

В результате показано, что излом концевой участка канавки с ориентацией по потоку в канале при его оптимальной относительной длине приводит к проникновению интенсивного закрученного потока в концевую зону канавки и интенсифицирует теплообмен в ней. Наблюдается рост относительной теплоотдачи от внутренней поверхности канавки типа бумеранг в 1.2 раза по сравнению со случаем прямой наклонной канавки.

### Финансирование работы

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (гранты 22-19-00056 (тестирование) и 23-19-00083 (расчеты)).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] S. Rashidi, F. Hormozi, B. Sunden, O. Mahian, *Appl. Energy*, **259**, 1491 (2019). DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.168
- [2] Y. Rao, B. Li, Y. Feng, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **61**, 201 (2015). DOI: 10.1016/j.expthermfluidsci.2014.10.030
- [3] Y. Chen, Y.T. Chew, B.C. Khoo, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **55**, 8100 (2012). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.08.043
- [4] C.N. Jordan, L.M. Wright, *J. Turbomach.*, **135**, 011028 (2013). DOI: 10.1115/1.4006422
- [5] P. Zhang, Y. Rao, P.M. Ligrani, *Int. J. Therm. Sci.*, **177**, 107581 (2022). DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107581
- [6] S.A. Isaev, M.S. Gritckevich, A.I. Leontiev, O.O. Milman, D.V. Nikushchenko, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **145**, 118737 (2019). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118737
- [7] S.A. Isaev, *Fluid Dyn.*, **57** (5), 558 (2022). DOI: 10.1134/S0015462822050081
- [8] С.А. Исаев, С.В. Гувернюк, Д.В. Никущенко, А.Г. Судаков, А.А. Синявин, Е.Б. Дубко, *Письма в ЖТФ*, **49** (15), 39 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.15.55863.19560 [S.A. Isaev, S.V. Guvernyuk, D.V. Nikushchenko, A.G. Sudakov, A.A. Sinyavin, E.B. Dubko, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (8), 33 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.08.56684.19560].
- [9] S.A. Isaev, S.Z. Sapozhnikov, D.V. Nikushchenko, V.Yu. Mityakov, V.V. Seroshtanov, E.B. Dubko, *Fluid Dyn.*, **59** (1), 45 (2024). DOI: 10.1134/S0015462823602310
- [10] M.A. Zubin, A.F. Zubkov, *Fluid Dyn.*, **57** (1), 77 (2022). DOI: 10.1134/S0015462822010128.
- [11] S.A. Isaev, A.G. Sudakov, D.V. Nikushchenko, V.B. Kharchenko, L.P. Iunakov, *Fluid Dyn.*, **58** (6), 1004 (2023). DOI: 10.1134/S0015462823601304