

03

## **Перестройка и интенсификация смерчеобразного течения в узком канале при удлинении овальной лунки с фиксированной площадью пятна**

© С.А. Исаев<sup>1,3</sup>, А.И. Леонтьев<sup>2</sup>, М.Е. Гульцова<sup>3</sup>, И.А. Попов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет — Казанский авиационный институт

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

E-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступило в Редакцию 21 января 2015 г.

На основе численного решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса, замкнутых с помощью модифицированного переноса сдвиговых напряжений, проанализирована перестройка отрывного обтекания овальной наклоненной под углом  $45^\circ$  лунки на стенке узкого плоскопараллельного канала при ее уширении с сохранением глубины и площади пятна. Интенсификация генерируемых спиралевидных вихрей с достижением скорости поперечного потока, превышающей 80% от среднemasсовой скорости в канале, при ширине, втрое меньшей эквивалентного диаметра лунки, сопровождается снижением гидравлических потерь ниже уровня потерь в канале со сферической лункой.

Как известно [1], генераторы вихрей в жидкостях и газах различаются формой, размерами и назначением. Так, рассматривая в [1] маломасштабные конструкции крыловидного типа, установленные на поверхности крыла и инициирующие протяженные спиралевидные вихри, делается вывод, что вихревые генераторы интенсифицируют турбулентное смешение в пристеночном слое, упорядочивая его структуру. Размещение диска малого размера перед торцом цилиндра улавливает тороидальный вихрь в зазоре между диском и цилиндром и вызывает значительное снижение лобового сопротивления компо-

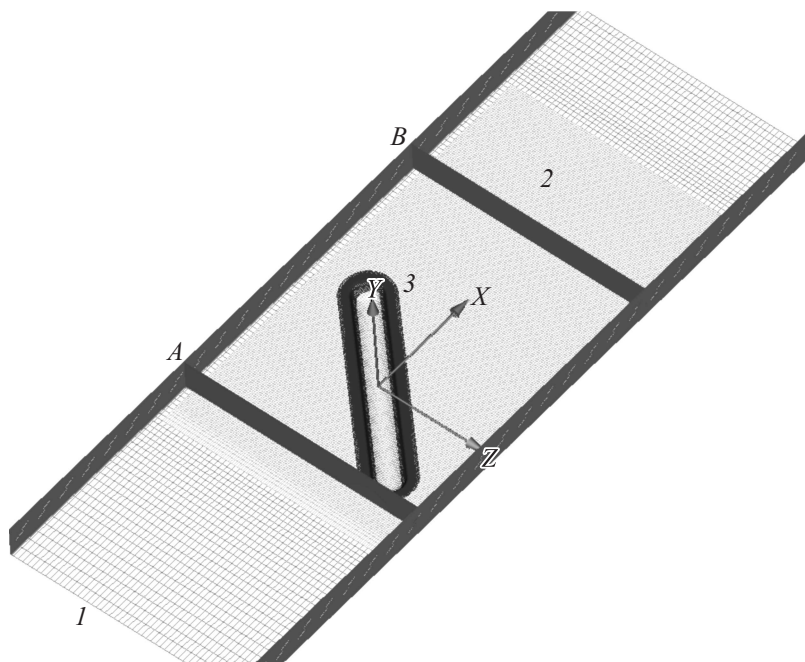
новки в дозвуковом [2] (почти на два порядка) и сверхзвуковом [3] (пятикратное) воздушных потоках. Управление обтеканием толстых несущих поверхностей с помощью встроенных в контур вихревых ячеек с распределенным (с поверхности центрального тела) и щелевым отсосом для интенсификации циркулирующих в них потоков позволяет обеспечить практически безотрывное обтекание толстых профилей, а также большую подъемную силу (коэффициент подъемной силы  $C_y$  порядка 2.5) [4] и высокое аэродинамическое качество (порядка 160) [5]. Важно отметить, что улучшение аэродинамических характеристик тел с уловленными вихрями [2,3] и вихревыми ячейками [3,4] связывается с высокой интенсивностью циркуляционного течения в вихрях, когда максимальные местные скорости оказываются одного порядка со скоростью набегающего потока.

Вихревая интенсификация теплообмена при обтекании рельефов с лунками [6] давно рассматривается с позиций самоорганизации смерчеобразных вихревых структур в сферических лунках [7]. Обоснование выдвинутой концепции проведено численно при идентификации струйно-вихревых структур в пространственных отрывных течениях в глубоких лунках для ламинарного [8] и турбулентного [9] режимов. Анализ вихревой гидродинамики и теплообмена в канале с лункой с учетом гидравлических потерь дан в [10], а карта режимов обтекания лунки представлена в [11]. Важно подчеркнуть, что, несмотря на трансформацию вихревой структуры течения в лунке с увеличением ее глубины, интенсивность вторичного (поперечного) и возвратного течения остается весьма умеренной, т.е. величины местной скорости не превышают 50% от характерной, среднемассовой скорости потока в канале. Идея о взаимосвязи интенсификации вторичного течения в пристеночном слое с формой лунки, которая генерирует смерчеобразные вихри, реализовалась в построении овальной лунки, представляющей собой две половинки сферической лунки, разделенные цилиндрической вставкой [12]. Первоначально такая лунка называлась траншейной и помимо двух геометрических размеров — ширины и удлинения, характеризуется углом наклона к набегающему потоку. При рассмотрении овальных лунок небольшого удлинения на плоской стенке высокого [13] и узкого каналов [14] отмечена тенденция к интенсификации вторичного течения при довольно существенном росте гидравлических потерь. В задачу данной работы входит анализ турбулентного течения и гидравлических потерь в узком канале с

овальной лункой при ее последовательном уширении от сферической до траншейной (с трехкратным уменьшением ширины) при сохранении примерно постоянной площади пятна и фиксации глубины лунки (0.13 в долях характерного размера — диаметра пятна эквивалентной сферической лунки).

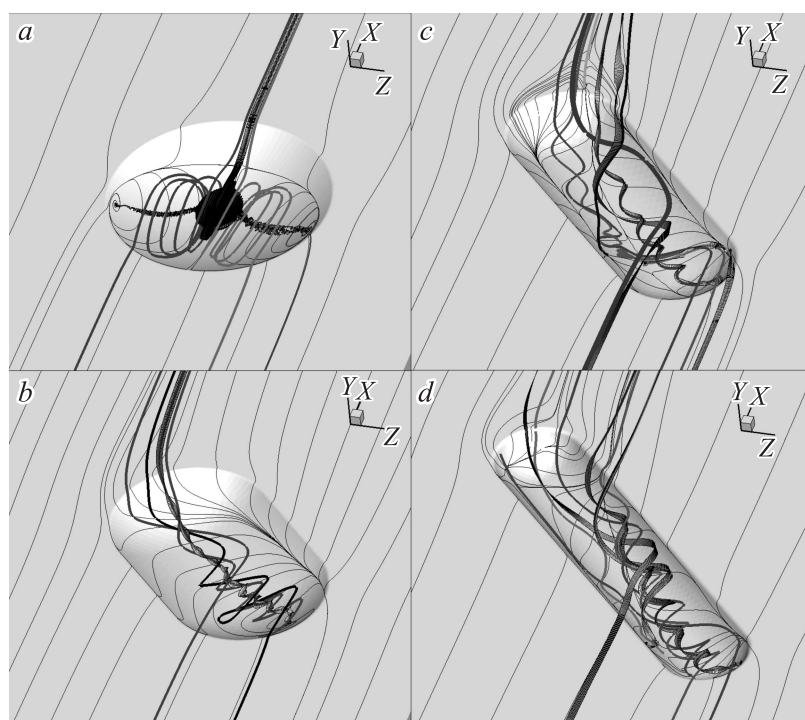
Рассматривается конвективный теплообмен в узком канале прямоугольного сечения шириной 2.5 и высотой 0.33, на входе которого задается профиль скорости полностью развитого турбулентного потока несжимаемой жидкости. На омываемых стенках выполняются условия прилипания. Профили продольной, вертикальной и поперечной составляющих скорости  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , а также характеристики турбулентности (энергия  $k$ , удельная скорость диссипации  $\omega$ , вихревая вязкость  $\mu_t$ ) определяются из решения специальной задачи установления течения в периодической секции рассматриваемого канала при выбранном числе Рейнольдса  $Re$ , равном  $10^4$ . В качестве масштабов обезразмеривания задаются среднемассовая скорость  $U$ , диаметр пятна сферической лунки  $D$ , плотность  $\rho$  и вязкость  $\mu$ . Модель переноса сдвиговых напряжений Ментера 2003 года с модификацией, учитывающей влияние кривизны линий тока, используется в сочетании с решением исходных уравнений с помощью многоблочных вычислительных технологий [15]. Лунки располагаются на некотором расстоянии (3) от входа в канал, выбранном из условия их незначительного влияния на входные условия (рис. 1). Радиус скругления кромок принимается равным 0.025. На выходе канала длиной порядка 7 задаются мягкие граничные условия. Полуширина овальной лунки  $\Delta$  варьируется от 0.17 до 0.5, а угол наклона к направлению потока в канале фиксируется равным  $45^\circ$ .

Задача решается на многоблочных пересекающихся структурированных сетках различного масштаба (рис. 1). Прямоугольный канал покрывается декартовой сеткой, сгущающейся к стенкам (шаг у стенки  $10^{-4}$ ) и к ареалу с лункой (минимальные продольный и поперечный шаги равны 0.06 и 0.05 соответственно). Общее количество ячеек в канале  $119 \times 69 \times 93$ . Около лунки располагается подробная сетка для отображения гидродинамических особенностей в ближнем следе (с минимальными шагами вдоль и поперек потока, равными 0.03). Высота сетки 0.13, ширина варьируется в зависимости от размера лунки от 1.6 до 2.1. Длина сетки порядка 3. В случае сферической лунки эта сетка декартовая, а для овальных лунок она криволинейная,



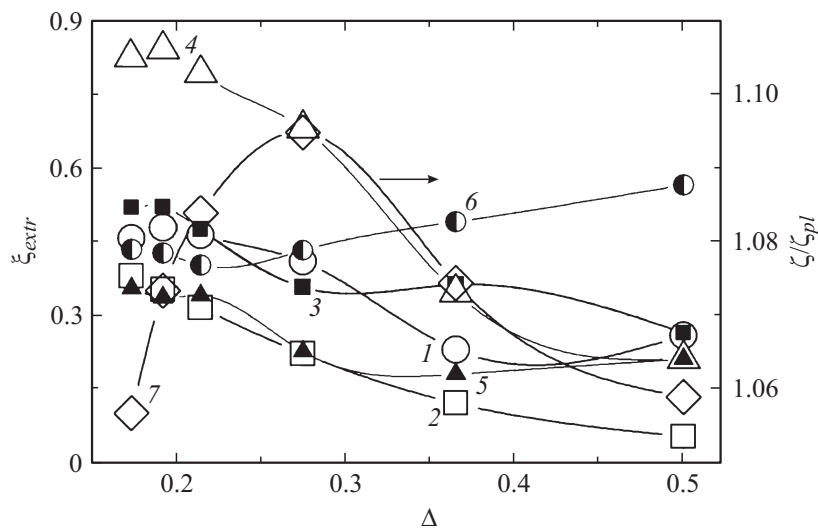
**Рис. 1.** Схема расположения овальной лунки в узком канале (со снятой верхней стенкой) с декартовой системой координат  $X, Y, Z$  в центре пятна лунки на проекции нижней стенки с нанесенными многоблочными сетками:  $1$  — прямоугольная сетка в канале;  $2$  — криволинейная сетка, согласованная с овальной лункой;  $3$  — кромочная сетка.  $A, B$  — сечения контрольного участка для определения гидравлических потерь.

согласованная с нижней омываемой стенкой канала. Ареал сферической лунки разбивается цилиндрической сеткой, согласованной с ее поверхностью, причем для предотвращения проблем со сгущением узлов в приосевой сетке вводится дополнительная близкая к прямоугольной сетка. Минимальный шаг в районе кромки  $0.002$ . Для овальных лунок вводится специальная кромочная сетка для описания зон с высокими градиентами определяющих параметров. Общее количество ячеек многоблочных сеток составляет порядка  $1.3-1.5 \cdot 10^6$ .



**Рис. 2.** Сравнение струйно-вихревых структур для сферической и овальной лунки:  $\Delta = 0.5$  (a), 0.365 (b), 0.274 (c) и 0.214 (d).

Некоторые из полученных результатов представлены на рис. 2, 3. С уменьшением полуширины лунки  $\Delta$  при сохранении площади пятна растет ее удлинение (от 1 до 6), а значит и степень воздействия лунки на течение в ближнем следе. Гидравлические потери определяются, как описано в [10,14], по границам контрольного участка длиной 3 облученного ( $\xi$ ) и плоского ( $\xi_{pl}$ ) каналов (рис. 1). Численные расчеты интегральных и локальных характеристик вихревого теплообмена дополнены компьютерной визуализацией вихревых структур (рис. 2) и демонстрируют перестройку отрывного обтекания овальной лунки с ростом ее удлинения и ее растущую эффективность как генератора спиралевидных вихрей (рис. 3).



**Рис. 3.** Влияние полуширины  $\Delta$  овальной лунки при фиксированной площади пятна на экстремальные характеристики  $\xi_{extr}$  отрывного течения, турбулентности и на относительные гидравлические потери в канале: 1 —  $u_{\min}$ ; 2 —  $v_{\max}$ ; 3 —  $v_{\min}$ ; 4 —  $w_{\max}$ ; 5 —  $w_{\min}$ ; 6 —  $k_{\max}$ ; 7 —  $\xi/\xi_{pl}$ .

Графики поведения экстремальных характеристик турбулентного течения в канале во многом объясняют преимущество удлиненных овальных лунок. С уменьшением  $\Delta$  кардинально интенсифицируется вторичное течение в лунке, определяемое величиной поперечной составляющей скорости. Конечно, следует учитывать увеличение относительной глубины лунки, определяемой отношением постоянной глубины 0.13 к постоянно уменьшающейся ширине и доходящей до 0.38. Наряду с некоторым ростом отрицательной минимальной скорости отрывного течения  $u_{\min}$ , отрицательная минимальная скорость  $w_{\min}$  вторичного течения возрастает в 3 раза, достигая 0.82 среднemasсовой скорости в канале. При этом максимальная поперечная составляющая скорости меняется слабо. Привлекает внимание монотонное снижение с уменьшением  $\Delta$  максимальной величины энергии турбулентности, свидетельствующей о том, что вихревое течение в лунке имеет тенденцию к ламинаризации.

Таким образом, можно сделать выводы:

1. Обнаружена тенденция к возрастанию максимальной по модулю поперечной скорости потока в канале с удлиняющейся овальной лункой фиксированной площади пятна и глубины до величин порядка средне-массовой скорости в канале.

2. Коэффициент гидравлических потерь на контрольном участке канала имеет максимум при уменьшении ширины овальной лунки, а при 0.34 оказывается меньше, чем для канала со сферической лункой.

3. С уширением овальной лунки обнаружена тенденция к ламинаризации вихревого течения в канале.

4. С уменьшением ширины овальной лунки резко сокращается размер отрывной зоны течения в верховье лунки и практически вся лунка становится проточной, заполненной закрученным потоком.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда по проекту № 14-19-00003 и при частичной государственной поддержке научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (ведущий ученый — С. Исаев, КНИТУ-КАИ, г. Казань) по гранту правительства России № 14.Z50.31.0003.

## Список литературы

- [1] *Чжен П.* Управление отрывом потока. М.: Мир, 1979. 552 с.
- [2] *Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А.* Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
- [3] *Isaev S.A., Baranov P.A., Mikhalev A.N., Sudakov A.G.* // Tech. Phys. Lett. 2014. V. 40. Iss. 11. P. 996–999.
- [4] Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А.В. Ермашина и С.А. Исаева. М.: МГУ, 2003. 360 с.
- [5] *Isaev S.A., Baranov P.A., Sudakov A.G., Ermakov A.M.* // Tech. Phys. Lett. 2015. V. 41. Iss. 1. P. 76–79.
- [6] *Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И.* Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб.: Судостроение, 2005. 392 с.
- [7] *Кикнадзе Г.И., Гачечиладзе И.А., Алексеев В.В.* Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация теплообмена, сопровождающая это явление. М.: Издательство МЭИ, 2005. 83 с.

- [8] *Isaev S.A., Leont'ev A.I., Frolov D.P., Kharchenko V.B.* // Tech. Phys. Lett. 1998. V. 24. Iss. 3. P. 209–211.
- [9] *Isaev S.A., Leontiev A.I., Baranov P.A.* // Tech. Phys. Lett. 2000. V. 26. Iss. 1. P. 15–18.
- [10] *Isaev S.A., Kornev N.V., Leontiev A.I., Hassel E.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2010. V. 53. Iss. 1–3. P. 178–197.
- [11] *Коваленко Г.В., Терехов В.И., Халатов А.А.* // Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 51. № 6. С. 78–88.
- [12] *Isaev S.A., Leontiev A.I., Mitjakov A.V., Pyshnyi I.A.* // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2003. V. 76. P. 31–34.
- [13] *Isaev S.A., Leont'ev A.I., Baranov P.A.* // Thermal Engineering. 2007. V. 54. N 8. P. 655–663.
- [14] *Turnow J., Kornev N., Isaev S., Hassel E.* // Heat Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung. 2011. V. 47. Iss. 3. P. 301–311.
- [15] *Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е.* Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 316 с.