

03

## Моделирование эффекта снижения гидравлических потерь при движении турбулентного потока в поворотном канале с круговой каверной при больших углах ее раскрытия

© С.А. Исаев<sup>1</sup>, Е.И. Калинин<sup>2</sup>, А.А. Терешкин<sup>1</sup>, А.Е. Усачов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

<sup>2</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет

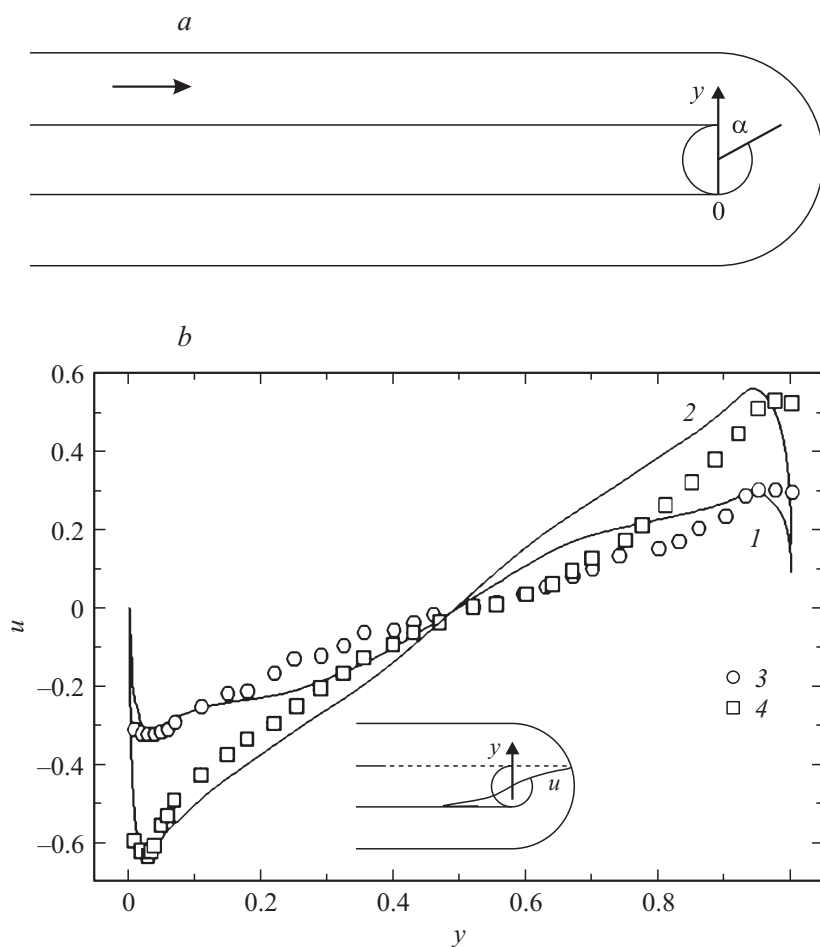
<sup>3</sup> Московский комплекс ЦАГИ

E-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступило в Редакцию 23 октября 2014 г.

На основе решения уравнений Рейнольдса для несжимаемой вязкой жидкости, замкнутых с помощью скорректированной с учетом кривизны линий тока модели переноса сдвиговых напряжений Ментера, рассчитано турбулентное течение в поворотном канале с круговой каверной при переменном угле ее раскрытия. Численные прогнозы хорошо согласуются с экспериментами Кастро–Савельсберга при умеренных углах раскрытия каверны. Обнаружено значительное (на 25%) сокращение гидравлических потерь в поворотном канале с полным раскрытием каверны по сравнению с гладким каналом при  $Re = 10^5$ .

Турбулентное течение в поворотном канале относится к двумерным тестовым задачам, в частности, используемым для апробации полуэмпирических моделей турбулентности [1]. В [2, 3] в месте поворота размещена круговая каверна диаметром  $D$  с переменным углом раскрытия и отброшен участок обращенного течения (рис. 1, *a*). Угол раскрытия каверны  $\alpha$  за счет смещения обечайки варьировался в пределах от 0 до  $80^\circ$ , а число Рейнольдса, определенное по характерному размеру  $D$  и среднемаассовой скорости в канале, изменялось от нескольких десятков тысяч до сотен тысяч. Замеры скорости течения в канале и радиальных сечениях каверны производились в [2] с помощью лазерно-доплеровского измерителя скорости и техники PIV (Particle Image



**Рис. 1.** Схема поворотного канала с круговой каверной при переменном угле раскрытия  $\alpha$  (a) и сравнение расчетных результатов (1, 2) с экспериментальными данными (3, 4) [2] при фиксированном числе Рейнольдса  $Re = 10^5$  и переменном угле раскрытия  $\alpha$ : 1, 3 —  $\alpha = 20^\circ$ ; 2, 4 —  $60^\circ$  (b). На вставке (b) показано место расположения профиля продольной составляющей скорости в круговой каверне.

Velocimetry). Сравнение расчетов [3] с экспериментами [2] показало большое отличие численных прогнозов от данных измерений. Ошибки в расчетах обусловлены применением схем низкого (первого) порядка аппроксимации, генерирующих значительную схемную диффузию при моделировании отрывных течений [4]. В данной работе проведен параметрический численный эксперимент по влиянию угла раскрытия круговой каверны на локальные и интегральные параметры потока с использованием более точных многоблочных вычислительных технологий (МВТ) [5], реализованных в пакете VP2/3 (скорость–давление, двумерная и трехмерная версии).

Задачей работы являлось численное обоснование уменьшения гидравлических потерь в поворотном канале с круговой каверной при больших углах ее раскрытия по сравнению с гладким поворотным каналом без каверны.

Рассматривается упрощенная двумерная модель установки [2], в которой нижняя часть поворотного канала с круговой каверной не обрывается за поворотом, а продлевается до размера подводящего плоскопараллельного канала (рис. 1, *a*). В этом случае нет необходимости рассчитывать движение воздуха в окружающем установку пространстве и граничные условия можно поставить на входной и выходной границах поворотного канала, как это, например, делается в [1]. Длина рассчитанного канала близка к экспериментальному аналогу и составляет 10, а высота канала равна 1. На входе в канал задаются профили продольной составляющей скорости  $u$  и турбулентной энергии  $k$  для полностью развитого турбулентного потока несжимаемой вязкой жидкости (избыточное давление  $p$  и вертикальная составляющая скорости  $v$  равны 0). Масштаб турбулентности принимается равным характерному размеру  $D$ . На выходе из поворотного канала выставляются „мягкие“ граничные условия. Условия прилипания задаются на омываемых стенках канала, внутренней и внешней поверхности обечайки каверны. Толщиной обечайки пренебрегаем. Угол раскрытия каверны варьируется от 0 до 180°, а число Рейнольдса — от  $4 \cdot 10^4$  до  $14 \cdot 10^4$ .

Для решения используются специально развитые для задач этого типа МВТ [5], основанные на пересекающихся структурированных сетках простой топологии. В рамках такого подхода наиболее просто описываются многосвязные геометрии, причем накладываться могут

близкие к ортогональным сетки различного типа. В данном случае поворотный канал покрывается С-образной сеткой, содержащей  $320 \times 134$  ячеек, сгущающихся к стенкам и к каверне. В подводящем и отводящем плоскопараллельных участках канала построены сетки с  $81 \times 134$  ячейками, причем продольный шаг сетки от входной и выходной границ уменьшается от 0.5 до 0.01 (в начале поворота). Шаг у стенки равен  $10^{-4}$ . Кольцевой участок канала разбит равномерной по окружной координате сеткой и содержит порядка 160 ячеек по криволинейному контуру. Цилиндрическая сетка внутри круговой каверны содержит  $94 \times 314$  ячеек, распределенных со сгущением к стенке и к окну каверны по радиальной координате и равномерно по окружной. На центр каверны накладывается равномерная квадратная сетка размером  $0.32 \times 0.32$  с шагом 0.01 по продольной  $x$  и вертикальной  $y$  координатам.

Записанные относительно декартовых составляющих скорости  $u$ ,  $v$  осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса, замкнутые дифференциальными уравнениями модели переноса сдвиговых напряжений Ментера, линеаризуются и записываются относительно приращений зависимых переменных [4,5]. В рамках концепции расщепления по физическим процессам уравнение неразрывности заменяется уравнением для поправки давления, следуя процедуре SIMPLEC, предложенной Ван-Дурмалом и Рейтби для самих зависимых переменных. Чтобы избежать немоногоного распределения давления для сеток с расположением переменных в центре ячеек, применяется подход Рхи–Чоу для коррекции скорости на гранях расчетных ячеек. Для снижения численной диффузии, вызванной ошибками дискретизации конвективных членов, в неявной части уравнений переноса количества движения используется одномерный аналог схемы с квадратичной интерполяцией против потока Леонарда. В то же время для уравнений переноса характеристик турбулентности, чтобы отобразить резкое, подчас скачкообразное изменение параметров, применяется схема TVD (Total Variation Diminishing) [5]. Диффузионные члены аппроксимируются центральными разностями. С целью скорейшего сглаживания невязок для дискретизации конвективных членов в неявной части используются односторонние разности против потока. Решение уравнения Пуассона для поправки давления производится методом сопряженного градиента, а системы алгебраических уравнений переноса решаются с использованием аналога сильно неявной процедуры. В многоблочных

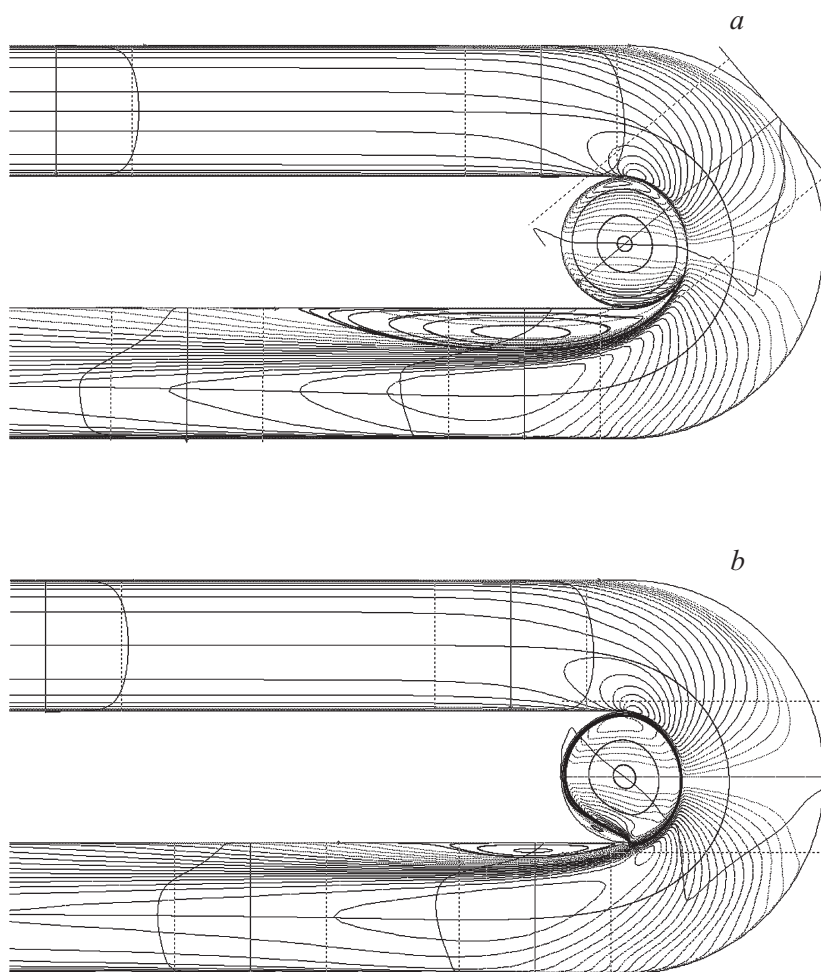
вычислительных технологиях выполняется декомпозиция расчетной области на фрагменты, которые покрываются пересекающимися сетками. В приграничных ячейках параметры определяются с помощью линейной интерполяции, которая, как показано в [5], не уступает по точности консервативному аналогу. В целом при тестировании показано, что МВТ близка по точности методологии, основанной на адаптивных сетках, однако требует существенно меньших вычислительных ресурсов.

В расчетах используется модифицированная версия MSST 2003 года [6] с учетом влияния кривизны линий тока на характеристики турбулентности при введении корректирующей функции, зависящей от турбулентного числа Ричардсона  $Ri_t$ . В рамках подхода Лешцинера и Роди [4] корректирующая функция  $f_c = 1/(1 + C_c Ri_t)$  напрямую влияет на вихревую вязкость. Полуэмпирическая константа  $C_c$  равна 0.02 [7].

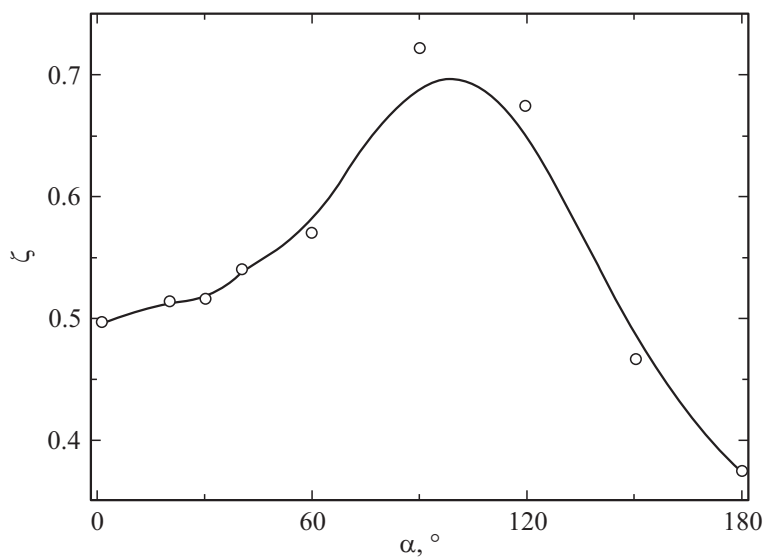
Хорошее согласование на рис. 1, *b* численных прогнозов продольной составляющей скорости  $u$  в сечении каверны (профили  $u(y)$  показаны на вставке к рис. 1, *b*), полученных при решении с помощью МВТ уравнений Рейнольдса с замыканием по модифицированной MSST, с экспериментальными данными [2] при изменении углов раскрытия от 20 до 60° и при фиксированном числе Рейнольдса  $10^5$  свидетельствует о приемлемости модифицированной модели турбулентности и основанной на МВТ-методологии (рис 1, *b*). Следует отметить, что увеличение размера окна каверны приводит к заметному повышению скорости в каверне, прежде всего в ядре цилиндрического вихря.

Компьютерная визуализация циркуляционного течения в кавернах при различных углах раскрытия  $\alpha$  показывает формирование в них цилиндрических уловленных вихрей с замкнутыми линиями тока, близкими к окружностям (рис. 2). По мере раскрытия скорости возвратного течения в кавернах возрастают. Вблизи верхней стенки отводящего канала за каверной генерируется отрывная зона, продольные размеры которой незначительно изменяются в диапазоне углов раскрытия от 1 до 120°. При больших углах раскрытия отрывная зона постепенно сокращается, причем при  $\alpha = 180^\circ$  она становится вдвое короче и заметно тоньше, чем в малых и средних углах  $\alpha$ .

Как следствие (рис. 3), гидравлические потери  $\xi$  в поворотном канале оказываются максимальными при  $\alpha = 90-100^\circ$ , а потом по мере роста  $\alpha$  уменьшаются, становясь существенно меньше гидравлических



**Рис. 2.** Эволюция картин отрывного течения в поворотном канале с каверной при переменном угле раскрытия с нанесенными изотопами и профилями скорости при  $Re = 10^5$ .  $a - \alpha = 90^\circ$ ;  $b - 180^\circ$ . Штриховыми линиями показаны единичные уровни скорости.



**Рис. 3.** Влияние изменения угла раскрытия  $\alpha$  при фиксированном  $Re = 10^5$  на гидравлические потери  $\zeta$  канала с круговой каверной.

потерь в канале без каверны. При  $\alpha = 180^\circ$   $\zeta$  оказываются ниже на 25% по сравнению с  $\zeta$  при  $\alpha = 1^\circ$ .

Таким образом, при  $Re = 10^5$  обнаружено значительное (на 25%) сокращение гидравлических потерь в поворотном канале с полным раскрытием круговой каверны, расположенной в месте поворота, по сравнению с гладким каналом.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда по проекту № 14-19-00003.

## Список литературы

- [1] Smirnov P.E., Menter F. // Proc. ASME Turbo Expo Conf. 2008. N GT2008-50480. 10 p.
- [2] Savelsberg R., Castro I.P. // Experiments in Fluids. 2009. V. 46. P. 485–497.

- [3] *Sagr K.M., Aly H.S., Kassem H.I., Sies M.M., Wahid M.A.* // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2010. V. 37. P. 1072–1077.
- [4] *Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А.* Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
- [5] *Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е.* Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 316 с.
- [6] *Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.* // Turbulence, Heat and Mass Transfer 4 / Ed. K. Hajalic, Y. Nogano, M. Tummers. Begell House, Inc. 2003. 8 p.
- [7] *Isaev S.A., Baranov P.A., Zhukova Yu.V., Usachov A.E., Kharchenko V.B.* // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2014. V. 87. Iss. 4. P. 1002–1015.