



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

DOI: 10.18721/JPM.10402

УДК 532.542.4

ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С РЕЗКИМ ПОВОРОТОМ НА 180 ГРАДУСОВ

Д.О. Панов, В.В. Рис, Е.М. Смирнов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Методами LES-WALE и IDDES с применением кода ANSYS Fluent 16.2 выполнены расчеты течения в U -образном канале квадратного сечения ($R_{cl}/D_h = 0,65$). Результаты сопоставительных расчетов, проведенных для числа Рейнольдса $Re = 40000$ указанными методами, хорошо согласуются между собой. Для валидационных расчетов при $Re = 100000$, в условиях широко известных тестовых экспериментов, использован более экономичный метод IDDES. Проанализировано влияние толщины пограничного слоя перед входом в поворот на поле течения. Расчетное поле осредненной скорости оказалось в удовлетворительном согласии с опытными данными; вычисленные и измеренные потери давления полностью совпали. Сделан вывод о том, что основная причина оставшихся расхождений между данными расчетов и измерений поля скорости заключается в невозможности достичь полного соответствия постановки вычислительной задачи условиям эксперимента, а именно – по согласованности условий на входной границе.

Ключевые слова: U -образный канал; турбулентное течение; численное моделирование; LES; IDDES

Ссылка при цитировании: Панов Д.О., Рис В.В., Смирнов Е.М. Вихреразрешающее численное моделирование трехмерного турбулентного течения в канале с резким поворотом на 180 градусов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2017. Т. 10 № 4. С. 21–33. DOI: 10.18721/JPM.10402

EDDY RESOLVING NUMERICAL SIMULATION OF 3D TURBULENT FLOW IN A 180-DEGREE BEND OF STRONG CURVATURE

D.O. Panov, V.V. Ris, E.M. Smirnov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

The paper covers LES-WALE and IDDES data obtained with ANSYS Fluent 16.2 for turbulent flow in a strongly curved U -duct of square section ($R_{cl}/D_h = 0.65$). Results of comparative computations performed with two approaches for $Re = 40000$ are in a good agreement. For validation study at a higher Reynolds number, $Re = 100000$, performed under conditions of the well known tests (Cheah et al., 1996; Iacovides et al., 1998), the IDDES approach is used as a resource-saving one. Parametric computations cover analysis of inlet boundary layer thickness on the flow field. The

mean velocity field computed is in a satisfactory agreement with the experimental data, and the calculated pressure losses coincide completely with the measured one. The main cause of remaining discrepancies between the calculated and measured velocity field data lies in impossibility to achieve a full accordance of a computational task setting to the test conditions, namely in the part concerning accordance of inlet conditions.

Key words: *U*-duct; turbulent flow; numerical simulation; LES; IDDES

Citation: Panov D.O., Ris V.V, Smirnov E.M. Eddy resolving numerical simulation of a 3D turbulent flow in a 180-degree bend of strong curvature, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 10 (4) (2017) 21–33. DOI: 10.18721/JPM.10402

Введение

Каналы с изгибом на 180° , называемые также *U*-образными, характерны для систем конвективного охлаждения лопаток газовых турбин и проточных элементов теплообменных аппаратов. Весьма часто встречаются *U*-образные каналы с резким поворотом потока, когда радиус закругления стенки на внутренней стороне поворота меньше поперечного размера канала. Турбулентному течению в таком канале присуще особо сложное поведение, которое определяется, с одной стороны, взаимодействием возникающего на повороте интенсивного вторичного (поперечного) течения с обширным, весьма протяженным отрывом, а, с другой стороны, сильно неравновесной турбулентностью, развивающейся в условиях такого взаимодействия.

Интегральные и локальные характеристики турбулентного потока в каналах с резким поворотом на 180° исследуются экспериментально и методом численного моделирования в течение достаточно продолжительного времени. При этом особое внимание уделяется случаю канала квадратного сечения. Работа [1] содержит обширные данные о потерях давления на повороте прямоугольных каналов с различным отношением сторон поперечного сечения. Эти данные непосредственно использованы в соответствующем разделе широко известного справочника по гидравлическим сопротивлениям [2]. Для канала квадратного сечения в работе [1] исследованы потери давления в диапазоне значений числа Рейнольдса $Re = (5 - 30) \cdot 10^4$ ($Re = U_b \cdot H / \nu$, U_b – среднерасходная скорость, H – поперечный размер, ν – кинематическая вязкость

среды) и для относительных радиусов r закругления внутренней стенки в диапазоне $r/H = 0,01 - 1,0$.

В работе [3] приводятся данные о потерях давления в канале с радиусом средней линии поворота $R_{CL} = 0,65H$ ($r/H = 0,15$) в диапазоне $Re = (2 - 6) \cdot 10^4$. Результаты этих работ позволяют заключить, что в случае канала с резким поворотом коэффициент потерь давления практически перестает зависеть от числа Рейнольдса, начиная со значения $Re = 10^5$. При меньших числах Рейнольдса коэффициент потерь давления следует зависимости

$$\zeta = 8,71 \cdot Re^{0,154},$$

где $\zeta = 2\Delta P / (\rho U_b^2)$ (ΔP – перепад статического давления между сечениями канала на прямых участках перед и за поворотом, ρ – плотность) [3].

В работе [3] представлены также расчетные значения ζ , полученные на основе численного моделирования с применением URANS- и LES-подходов. Показано, что в диапазоне $Re = (2 - 6) \cdot 10^4$ результаты расчетов в случае использования LES-подхода с подсеточной моделью WALE [4] удовлетворительно совпадают с данными собственного эксперимента и данными работы [1].

В работах [5 – 7] детально исследована структура течения в неподвижном и вращающемся *U*-образном канале ($R_{CL}/H = 0,65$) квадратного сечения при $Re = 10^5$. Работы [5, 6] содержат результаты экспериментального исследования структуры течения непосредственно перед поворотом, в повороте и за ним, включая отрывную зону, с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС). В работе [7], продолжающей работы [5, 6], представлены также экспери-

ментальные данные о распределении коэффициента давления вдоль плоской (торцевой) стенки канала.

Результаты работ [5 – 7] широко используются в качестве тестовых для валидации различных подходов к численному моделированию структуры турбулентного течения в *U*-образных каналах с резким поворотом потока [8 – 12]. Работы [8 – 10] и ряд других показывают, что использование RANS-подхода с моделями изотропной турбулентной вязкости не позволяет получить удовлетворительного согласования с экспериментальными данными [5 – 7].

В работах [9, 11] представлены результаты расчетов полей скорости, полученные при использовании RANS-подхода с моделями рейнольдсовых напряжений (Second Moment Closure, SMC). По данным из этих работ можно заключить, что среди моделей рейнольдсовых напряжений наилучшие результаты дает низкорейнольдсовая модель TCL SMC (Two-Component-Limit SMC) [13]. Тем не менее, и эта модель существенно недооценивает протяженность отрывной области на выходе из поворота [11], по крайней мере, в случае неподвижного канала.

Дальнейший прогресс в повышении качества предсказательных расчетов рассматриваемого типа течений связывается с применением вихреразрешающих подходов. Авторы работы [12] проводили вычисления на основе (LES-WALE)-подхода в сочетании с методом пристенных функций (вычислительная модель из семейства Wall-Modeling LES). В случае неподвижного канала результаты этих вычислений лучше согласуются с данными экспериментов [5, 6], чем данные расчетов, выполненных в работе [11] по модели TCL SCM. Вместе с тем, остаются существенные расхождения расчетных и экспериментальных профилей скорости, особенно в сечении, расположенном несколько ниже по потоку от отрывной области.

Общий анализ результатов, представленных в работах [11, 12], приводит к заключению, что причинами оставшихся расхождений между данными расчетов и измерений поля скорости в тестовой конфигурации [5, 6] могут быть не только погрешности

измерений, несовершенство модели турбулентности и сеточная чувствительность численного решения, но и неполное соответствие постановки вычислительной задачи условиям эксперимента. Прежде всего, это касается неопределенностей в задании условий на входе в расчетную область. К сожалению, данные измерений [5, 6] для сечения, расположенного выше по потоку от поворота и служащего входным сечением в расчетных моделях, ограничены лишь тремя профилями продольной скорости. Более того, эти профили несимметричны, с различной толщиной пристенных пограничных слоев на противоположных стенках. Все это приводит к невозможности достаточно полной реконструкции входных условий и к некоторому произволу даже в выборе начальной толщины пограничного слоя. Как следствие, возникает вопрос о чувствительности результатов численного моделирования к заданию толщины пограничного слоя на входе в расчетную область.

В настоящей работе этот вопрос изучается применительно к условиям экспериментов [5 – 7] посредством численного моделирования на основе метода IDDES [14, 15]. Последний является гибридным неэональным RANS/LES-методом, который позволяет проводить вихреразрешающие расчеты турбулентных течений, ограниченных стенками, при высоких числах Рейнольдса и на ресурсах с существенно меньшей (по сравнению с «чистым» LES) вычислительной производительностью.

Изложению результатов IDDES-расчетов для числа Рейнольдса, равного 10^5 и отвечающего условиям экспериментов [5 – 7], предшествует представление данных сопоставительных расчетов по методам IDDES и LES-WALE, выполненных при числе Рейнольдса, уменьшенном до значения $4 \cdot 10^4$. Все расчеты проводились с использованием программного пакета вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent 16.2 [16].

Постановка задачи и вычислительные аспекты

Геометрическая модель *U*-образного канала, для которого экспериментально исследована структура течения [5 – 7], представ-

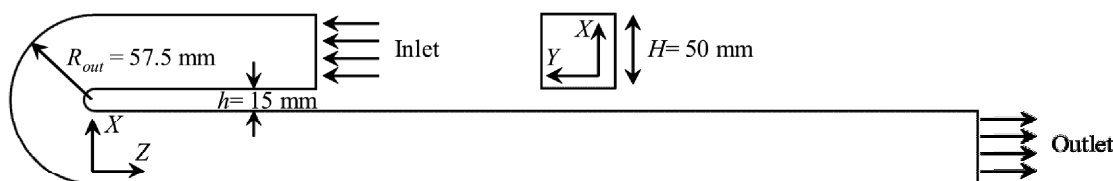


Рис. 1. Геометрия моделируемой части U-образного канала

лена на рис. 1. Измерения распределений продольной компоненты скорости в области, лежащей выше по потоку от поворота, проводились [5, 6] в поперечном сечении канала, расположенном на расстоянии $3H$ вверх по потоку от поворота ($Z/H = -3$). На рис. 1 это сечение показано как входное, таким же оно было принято при постановке задачи численного моделирования. Выходное сечение канала помещено нами на расстоянии 10 калибров от поворота ($Z/H = 10$), что близко к условиям экспериментов. Ось Z совпадает с осью канала на прямых участках и направлена в ту же сторону, что и поток. Значение $Z = 0$ соответствует плоскости, отделяющей прямые участки канала от участка поворота.

Входная скорость и характеристики турбулентности определялись в результате вспомогательных расчетов развивающегося течения в длинном прямолинейном квадратном канале, проведенных на основе RANS-подхода с моделью турбулентности $k-\omega$ SST. Исходно цель этих расчетов заключалась в получении распределений, наиболее соответствующих экспериментальным данным [5, 6] для первого измерительного сечения ($Z/H = -3$). Здесь, однако, встретились трудности, связанные с отмеченной выше несимметричностью экспериментальных профилей скорости, в то время как числен-

ное решение обладает симметрией относительно двух срединных плоскостей. В итоге были выбраны два варианта входных распределений, первый из которых соответствует начальной (при $Z/H = -3$) толщине пограничного слоя $\delta = 0,1H$ (в срединных плоскостях), а второй – значению $\delta = 0,2H$. Как будет показано ниже, первое из выбранных значений начальной толщины пограничного слоя соответствует результатам измерений профиля скорости у одной из стенок, а второе – экспериментальному профилю у противоположной стенки. Величина δ оценивалась как расстояние от стенки до точки со значением скорости, равным 0,99 от максимальной скорости в сечении. В выходном сечении канала задавалось постоянное давление, на стенках канала – условие прилипания.

Из возможностей, предоставляемых пакетом ANSYS Fluent 16.2 по вихреразрешающему численному моделированию, в настоящей работе предпочтение было отдано методу LES с подсеточной моделью WALE [4] и гибриднему подходу IDDES (в версии работы [15]). Для создания на входной границе турбулентного контента, необходимого при расчетах по методам LES и IDDES, на этой границе генерировались стохастические вихри, посредством активации опции “Vortex method” [16].

Таблица 1

Основные характеристики расчетных сеток для вихреразрешающих подходов

| № сетки | Подход | Re | $N_{cell} \cdot 10^{-6}$ | $\delta X^+, \delta Y^+$ | δZ^+ |
|---------|----------|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------|
| 1 | LES-WALE | $4 \cdot 10^4$ | 16,2 | 20 | 40 |
| 2 | IDDES | $4 \cdot 10^4$ | 6,9 | 50 | 50 |
| 3 | IDDES | 10^5 | 13,8 | 125 | 125 |

Обозначения: N_{cell} – общее число сеточных элементов; $\delta X^+, \delta Y^+, \delta Z^+$ – нормированные размеры ячеек в ядре потока.

С учетом представленных в работе [3] данных по сеточной чувствительности результатов (LES-WALE)-расчетов течения в канале той же геометрии, в настоящей работе вычисления проводились на трех квазиструктурированных расчетных сетках, состоящих из гексаэдральных элементов. Основные характеристики сеток даны в табл. 1.

Заметим, что сетка 1 была выбрана аналогичной одной из сеток, использованных в работе [3] (сетка 4 в указанном литературном источнике). В табл. 1 для всех расчетных сеток приведены (в нормированных величинах) характерные размеры ячеек, находящихся в ядре потока. Отметим также, что для пристенных ячеек нормированное расстояние от центра ячейки до стенки (X_1^+ или Y_1^+) не превышало единицы во всех представляемых численных решениях.

В работах [5 – 7] экспериментальные данные получены для относительно высокого значения числа Рейнольдса ($Re = 10^5$). При этом значении размерность использованных сеток (см. табл. 1) оказывается недостаточной для корректного применения LES-подхода с подсеточной моделью WALE, хорошо зарекомендовавшего себя, в частности, при проведении расчетов течения в канале данной геометрии при меньших значениях числа Рейнольдса ($Re = (2 - 6) \cdot 10^4$) [3].

В настоящей работе вычисления при $Re = 10^5$ выполнены с использованием более экономичного гибридного IDDES-подхода [14, 15], в котором относительно универсальные мелкомасштабные вихревые структуры, расположенные в пристенной области, моделируются $k-\omega$ SST моделью турбулентности, а крупные вихревые структуры, расположенные на удалении от стенки, разрешаются в рамках LES-подхода. Чтобы дополнительно проверить адекватность результатов, получаемых для течений рассматриваемого типа на основе подхода IDDES, были выполнены сопоставительные расчеты течения в канале той же геометрии при умеренном значении числа Рейнольдса ($Re = 4 \cdot 10^4$) как с использованием подхода LES-WALE, так и IDDES-подхода.

Из возможностей, предоставляемых пакетом ANSYS Fluent 16.2 по настройке вычислительного алгоритма, выбира-

лись следующие опции. Для аппроксимации конвективных слагаемых применена центрально-разностная схема второго порядка. Для аппроксимации производных по времени выбрана трехслойная схема Эйлера. Интерполяции давления на грань расчетной ячейки проводилась по опции, реализующей взвешенную сумму противопоточных схем первого и второго порядков. Расчет градиентов в центрах ячеек проводился по методу, основанному на формуле Гаусса – Грина. Для обеспечения связи уравнений баланса массы и импульса выбрана наиболее быстрая, последовательная схема решения уравнений с условно безытерационным продвижением по времени, а именно – NITA-FSM. Шаг по времени подбирался из условия, согласно которому максимальное значение локального числа Куранта не должно превосходить 0,8. Для получения осредненных характеристик потока статистика накапливалась на протяжении 150000 шагов по времени; перед этим делалось 40000 шагов для выхода на статистически установившийся режим. При инициализации каждого из расчетов, в качестве начального приближения использовались данные, полученные при решении RANS-уравнений, замкнутых по модели турбулентности $k-\omega$ SST.

Обсуждение результатов

Сопоставление решений по методам LES-WALE и IDDES. Расчеты течения с двумя подходами к моделированию турбулентности проводились при значении числа Рейнольдса, составляющем $4 \cdot 10^4$. При этом на входе в канал задавались распределения скорости и характеристик турбулентности, соответствующие начальной толщине пограничного слоя $\delta = 0,2H$.

Анализ полученных данных показал, что сопоставляемые методы вихреразрешающего моделирования для всей расчетной области дают идентичные по структуре и очень близкие в количественном отношении поля осредненной скорости. На рис. 2 сравниваются профили продольной осредненной скорости, построенные по результатам расчетов методами LES-WALE и IDDES для трех поперечных сечений ка-

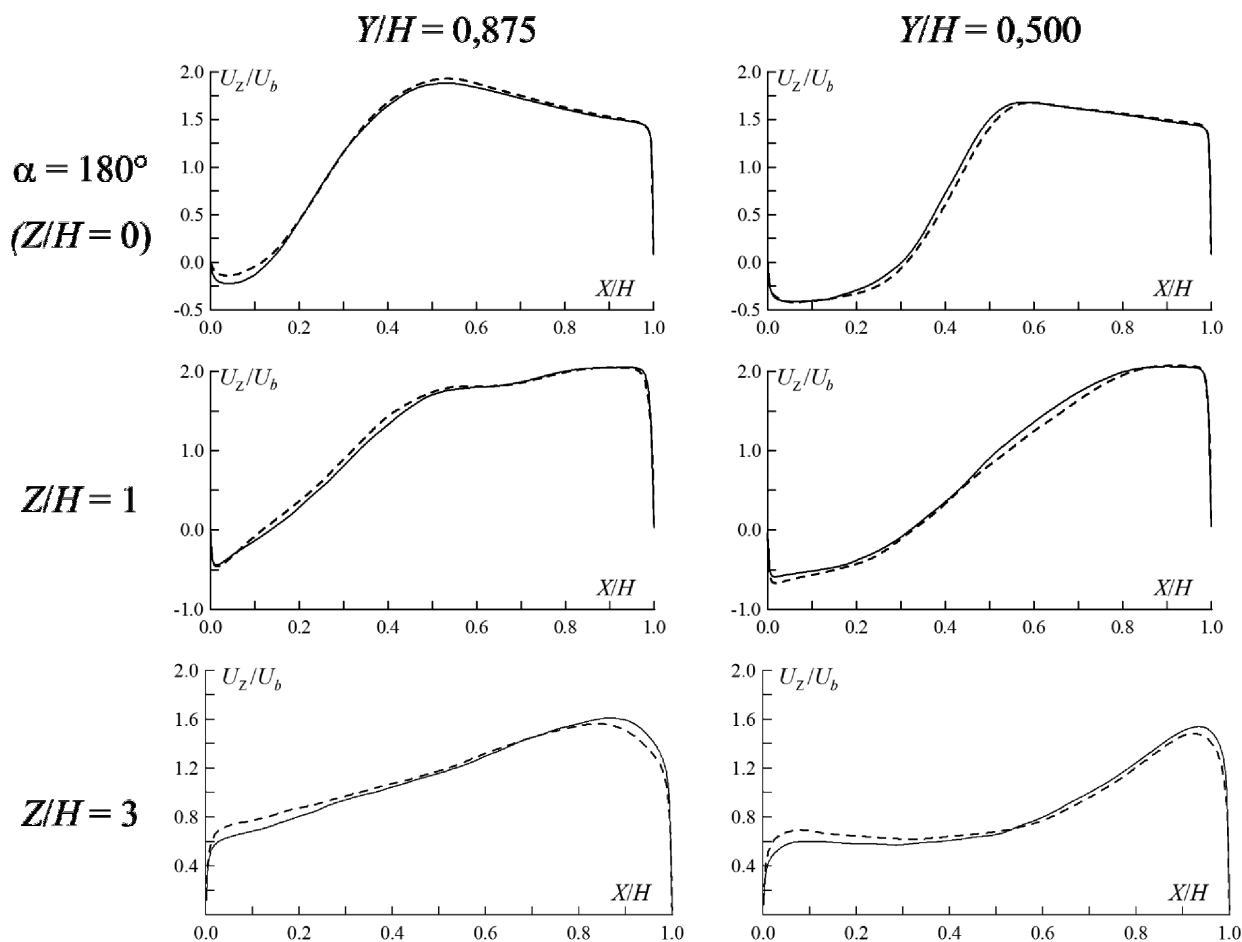


Рис. 2. Профили осредненной продольной компоненты скорости, рассчитанные методами LES-WALE (сплошные линии) и IDDES (штриховые линии); $Re = 4 \cdot 10^4$

нала, расположенных в области $Z/H \geq 0$. Профили даются на линиях, образованных пересечением поперечных сечений с двумя продольными сечениями, параллельными плоским стенкам. Сечение $Y/H = 0,875$ лежит ближе к одной из плоских стенок, а сечение $Y/H = 0,5$ совпадает со срединной плоскостью канала. Сколько-нибудь существенные различия в профилях наблюдаются лишь на участке за поворотом, где средняя разница локальных значений скорости в сходственных точках на профилях достигает 5%.

Более полное представление о различиях в распределениях продольной, нормированной на U_b , скорости в сечении $Z/H = 3$, даваемых методами LES-WALE и IDDES, можно получить из рис. 3. Видно,

что IDDES-подход дает несколько более однородное распределение скорости. Здесь следует отметить, что результаты расчетов для участка течения, расположенного на месте смыкания отрывной области и несколько ниже по потоку (сюда попадает и сечение $Z/H = 3$), оказываются наиболее чувствительными к выбору математической модели, лежащей в основе проводимых вычислений. Это заключение основывается не только на результатах настоящих расчетов, но и на общем анализе результатов более ранних работ, посвященных численному моделированию турбулентного течения в U-образном канале рассматриваемой геометрии [9, 11, 12].

Сопоставляемые подходы к моделированию турбулентности дали близкие результа-

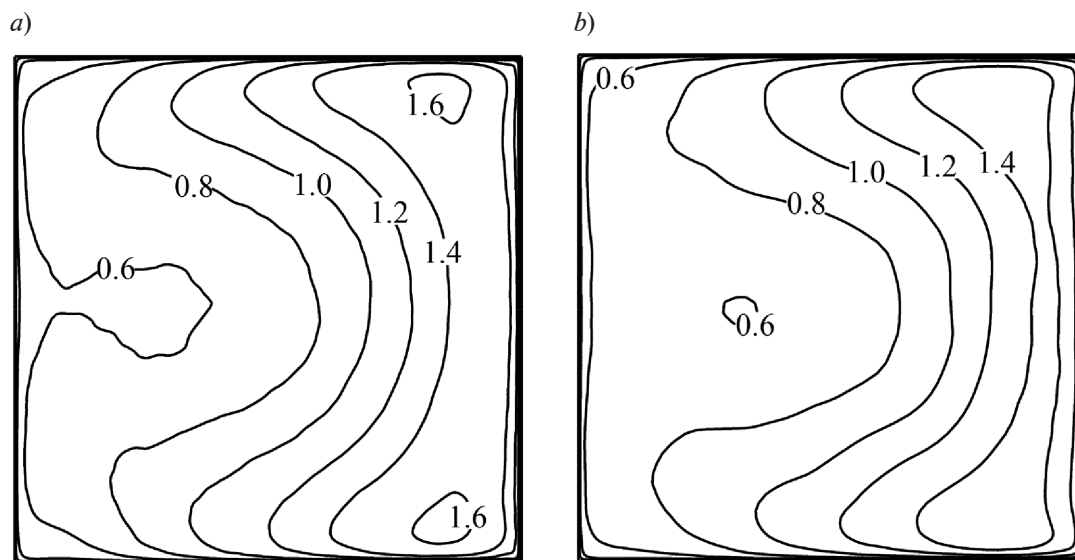


Рис. 3. Изолинии осредненной продольной компоненты скорости U_z/U_b в сечении $Z/H = 3$, рассчитанные методами LES-WALE (a) и IDDES (b); $Re = 4 \cdot 10^4$

ты и для интегральных характеристик. Так, значения коэффициента потерь давления ζ , определенные по разнице статических давлений в сечениях $Z/H = -3,0$ и $8,5$, составили $1,85$ в случае расчета методом IDDES и $1,87$ – методом LES-WALE.

В целом же, результаты проведенного сопоставительного анализа локальных и интегральных характеристик течения позволяют сделать заключение о хорошей согласованности данных, полученных по двум вихре-разрешающим методам и о целесообразности использования более экономичного IDDES-подхода для моделирования течения при $Re = 10^5$.

Сравнение экспериментальных и расчетных полей скорости для $Re = 10^5$. Как отмечалось выше, при проведении расчетов по методу IDDES при $Re = 10^5$, были выбраны два варианта входных распределений, с различной начальной толщиной пристенных слоев. В верхней части рис. 4 профили скорости, задаваемые в расчетах для входного сечения $Z/H = -3$, сопоставляются с результатами измерений [6] для того же сечения. Можно видеть, что полученное в эксперименте несимметричное распределение скорости в целом соответствует толщине $\delta = 0,1H$ около внешней (относительно изгиба) стенки и значению $\delta = 0,2H$ око-

ло внутренней стенки. Общее превышение входных расчетных значений скорости в ядре потока над экспериментальными значениями, особенно в случае $\delta = 0,2H$, можно связать с двумя факторами.

Во-первых, экспериментальное распределение скорости в сечении $Z/H = -3$ имеет явно выраженную скошенность.

Во-вторых, модель с изотропной вязкостью, использованная для описанных выше вспомогательных расчетов, не способна воспроизводить угловые вторичные течения, характерные для турбулентного течения в прямолинейных каналах прямоугольного сечения [17 – 19], и, соответственно, их выравнивающее действие на распределение скорости в поперечном сечении канала (см., например, работу [20]). Этот недостаток в задании входных распределений, представляется, однако, менее существенным, чем неопределенности в задании начальной толщины пограничного слоя, поскольку течение в области поворота и непосредственно за ним контролируется вторичными течениями другого рода, интенсивность которых зависит, прежде всего, от толщины вязких пограничных слоев на торцевых стенках.

Кроме входных профилей скорости, на рис. 4 приведены профили еще в четырех

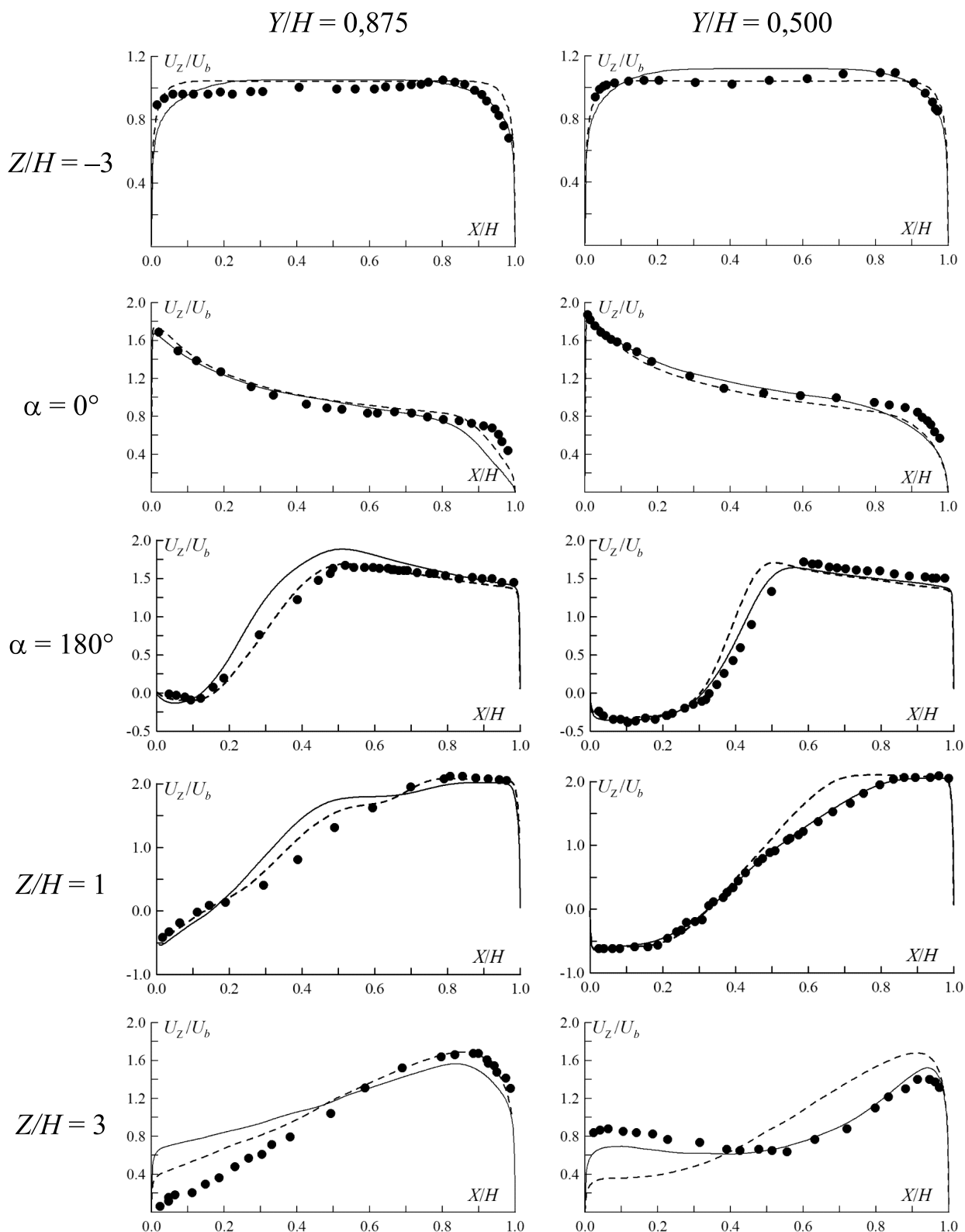


Рис. 4. Профили осредненной продольной компоненты скорости в различных сечениях канала для $Re = 10^3$: экспериментальные данные [6] (символы) и результаты расчетов по методу IDDES при $\delta = 0,1H$ (штриховые линии) и $\delta = 0,2H$ (сплошные линии)

последующих поперечных сечениях: в начале ($\alpha = 0^\circ$) и в конце поворота ($\alpha = 180^\circ$), а также в сечениях с большой долей возвратного течения ($Z/H = 1$) и сразу за отрывной зоной ($Z/H = 3$).

В начале поворота (сечение $\alpha = 0^\circ$) профили скорости, полученные в расчетах для разных входных условий, различаются только в зоне торможения у внешней изогнутой стенки. В сечении $\alpha = 180^\circ$ и последующих сечениях различие в рассчитанных профилях становится более существенным. Наибольшее различие наблюдается в сечении $Z/H = 3$, где профиль скорости для случая $\delta = 0,2H$ оказывается более однородным.

Сравнение результатов расчетов с данными эксперимента приводит к заключению, что расчетные профили скорости в продольном сечении $Y/H = 0,875$ ближе к экспериментальным данным в случае меньшей толщины входного пристенного слоя ($\delta = 0,1H$). Для сечения $Y/H = 0,5$ наблюдается обратная картина: в случае утолщенного входного пристенного слоя ($\delta = 0,2H$) расчетные профили скорости лучше согласуются с экспериментом.

В целом, влияние начальной толщины пограничного слоя, изменяемой в выбранных пределах, на отдельных участках профилей существенно превосходит погрешности измерений, которые в работах [5, 6] оцениваются на уровне 2 % от среднерасходной скорости.

Изменение статического и полного давления вдоль канала. На рис. 5 показаны распределения вдоль канала значений коэффициента давления C_p и локального коэффициента потерь полного давления ξ_{loc} , рассчитанные при $Re = 10^5$ для двух значений толщины пограничного слоя во входном сечении. Там же приведены экспериментальные значения C_p из работы [7]. Величины определены следующим образом:

$$C_p = 2(P_{in} - P_0) / (\rho U_b^2),$$

где P – локальное давление, взятое на средней линии плоской стенки; P_{in} – среднее по площади давление на входе;

$$\xi_{loc} = 2(\langle P_{0,in} \rangle - \langle P_0 \rangle) / (\rho U_b^2),$$

где $\langle P_0 \rangle, \langle P_{0,in} \rangle$ – среднемассовые величины полного давления в текущем сечении и на входе, соответственно.

Вертикальные пунктирные линии на графике соответствуют сечениям канала в начале ($\alpha = 0^\circ$) и в конце ($\alpha = 180^\circ$) поворота.

При сравнении расчетных и экспериментальных распределений коэффициента давления можно заключить, что они находятся в хорошем согласии, особенно в случае $\delta = 0,2H$.

Анализ данных для локального коэффициента потерь полного давления позволяет заметить, что основной прирост потерь происходит в повороте и на участке в четыре калибра за ним.

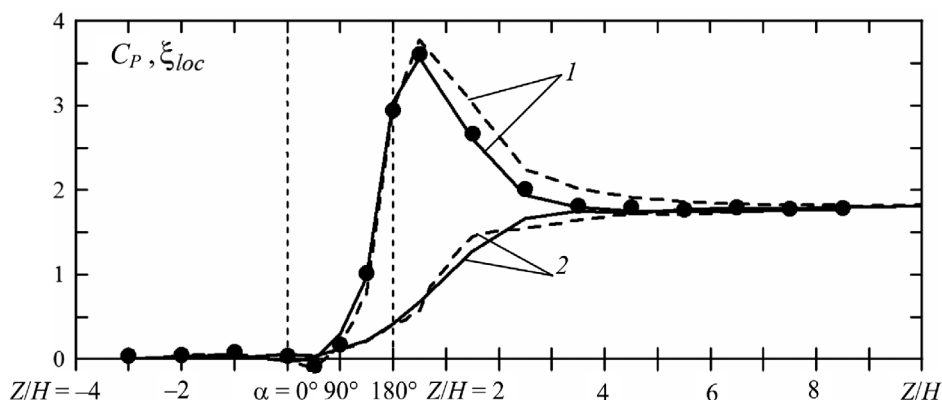


Рис. 5. Распределения вдоль канала локальных значений коэффициента давления C_p (1) и коэффициента потерь полного давления ξ_{loc} (2) для $Re = 10^5$: данные измерений [7] (символы) и результаты расчетов по методу IDDES при $\delta = 0,1H$ (штриховая линия) и $\delta = 0,2H$ (сплошная линия)

Таблица 2

Сравнение расчетных и экспериментальных данных по потерям в канале при $Re = 10^5$

| | Толщина пограничного слоя на входе, δ | ζ | ξ |
|-----------------------|---|---------|-------|
| Эксперимент [7] | От $\sim 0,1H$ до $\sim 0,2H$ на разных стенках | 1,80 | – |
| Расчеты методом IDDES | 0,1H | 1,77 | 1,80 |
| | 0,2H | 1,82 | 1,81 |

Обозначения: ζ и ξ – коэффициенты потерь статического и полного давления.

Как и следовало ожидать, по мере удаления от поворота (вниз по потоку), значения C_p и ξ_{loc} сближаются, при этом наиболее быстро это происходит в случае утолщенного пограничного слоя перед входом в поворот. Можно также видеть, что в обоих расчетных вариантах значения C_p и ξ_{loc} практически совпадают при $Z/H > 8$.

Далее значения C_p при $Z/H = 8,5$ мы будем отождествлять с коэффициентом потерь статического давления ζ , определенным по перепаду давления на прямых участках до и после поворота. В табл. 2 экспериментальные значения ζ , приведенные в работе [7], сопоставляются с нашими расчетными значениями. В таблице также даются расчетные значения коэффициента потерь полного давления ξ , вычисленного по перепаду полных давлений в тех же сечениях, что и при расчете ζ .

Оба значения коэффициента ζ , полученные в расчетах, отличаются от экспериментального менее чем на 2%, при этом экспериментальное значение лежит между двумя расчетными. Вычисленные значения ζ и ξ оказались слабо зависящими от вариации входных условий. Так, различия в коэффициентах потерь давления ζ , полученных для двух толщин входного пограничного слоя, составляют менее 3%. Различия же в расчетных значениях коэффициента потерь полного давления ξ еще меньше – около 0,5%.

Заключение

Для отработки методики вихререшающего численного моделирования турбулентного течения в канале с резким поворотом на 180° проведены сопоставительные расчеты с использованием метода

моделирования крупных вихрей, в варианте LES-WALE, и метода IDDES из семейства гибридных RANS/LES подходов. При весьма существенном различии в количестве сеточных элементов (около 16 млн. ячеек в случае LES и 7 млн. для IDDES) результаты расчетов, выполненных при значении числа Рейнольдса $Re = 4 \cdot 10^4$, находятся в хорошем согласии. Это дает дополнительную мотивацию к использованию относительно экономичного метода IDDES для проведения расчетов при более высоких значениях числа Рейнольдса.

Расчеты валидационной направленности по методу IDDES выполнены для условий экспериментов [5 – 7], проведенных при $Re = 10^5$ и широко используемых для оценки возможностей разных подходов к моделированию турбулентности в U-образных каналах с резким поворотом потока.

Изучено влияние толщины входного пограничного слоя на поле скорости и потери давления в повороте. Диапазон изменения этого параметра выбран с учетом неполной определенности входных условий в экспериментальном исследовании. В целом получено удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных полей скорости, а также практически полное совпадение данных по потерям давления.

Устранение оставшихся расхождений между данными расчетов и измерений поля скорости в рассматриваемой тестовой конфигурации представляется проблематичным, так как при скудности информации, полученной в экспериментах для поля скорости на входной границе, невозможно достичь полного соответствия постановки вычислительной задачи условиям эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Веревкин Н.Н.** Гидравлические сопротивления изолированных и составных колен прямоугольного сечения // В сб. «Промышленная аэродинамика: Воздуховоды». Вып. 7. М.: Оборонгиз, 1956. С. 25–51.
2. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 559 с.
3. **Панов Д.О., Юхнев А.Д.** Потери давления в канале с резким поворотом на 180°: результаты URANS и LES расчетов в сопоставлении с данными измерений // Труды Юбилейной конференции Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы теплообмена» и XXI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы тепло- и массообмена в энергетических установках». (22 – 26 мая 2017 г., СПб). В 2 тт. Т. 1. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. С. 236–239.
4. **Nicoud F., Ducros F.** Subgrid-scale stress modeling based on the square of the velocity gradient tensor // Flow, Turbulence and Combustion. 1999. Vol. 62. No. 3. Pp. 183–200.
5. **Cheah S.C., Iacovides H., Jackson D.C., Ji H., Launder B.E.** LDA investigation of the flow development through a rotating U-bend of strong curvature // In: The 5th International Symposium on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements. Paris, 1993. Pp. 269–276.
6. **Cheah S.C., Iacovides H., Jackson D.C., Ji H., Launder B.E.** LDA investigation of the flow development through rotating U-ducts // ASME Journal of Turbomachinery. 1996. Vol. 108. No. 3. Pp. 590–596.
7. **Iacovides H., Jackson D.C., Ji H., Kelemenis G., Launder B.E., Nikas K.-S.** LDA study of flow development through an orthogonally rotating U-bend of strong curvature and rib-roughened walls // ASME Journal of Turbomachinery. 1998. Vol. 118. No. 3. Pp. 386–391.
8. **Bo T., Iacovides H., Launder B.E.** Convective discretization schemes for the turbulence transport equations in flow predictions through sharp U-bends // International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow. 1995. Vol. 5. No. 1. Pp.33–48
9. **Iacovides H., Launder B.E., Li H.Y.** The computation of flow development through stationary and rotating U-ducts of strong curvature // International Journal of Heat and Fluid Flow. 1996. Vol. 17. No. 1. Pp. 22–33.
10. **Левченя А.М., Липницкая С.Н.** Оптимизация формы канала квадратного сечения с поворотом на 180° с целью снижения потерь: численное моделирование трехмерного турбулентного течения // Тепловые процессы в технике. 2011. № 12. С. 537–544.
11. **Suga K.** Predicting turbulence and heat transfer in 3D curved ducts by near-wall second moment closures // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2003. Vol. 46. No. 1. Pp. 161–173.
12. **Guleren K.M., Turan A.** Validation of large-eddy simulation of strongly curved stationary and rotating U-duct flows // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2007. Vol. 28. No. 5. Pp. 909–921.
13. **Craft T.J., Launder B.E.** A Reynolds-stress closure designed for complex geometries // International Journal of Heat and Fluid Flow. 1996. Vol. 17. No. 3. Pp. 245–254.
14. **Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.Kh., and Travin A.K.** A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2008. Vol. 29. No. 6. Pp. 1638–1649.
15. **Gritskevich M.S., Garbaruk A.V., Schütze J., Menter F.** Development of DDES and IDDES formulations for the $k-\omega$ shear stress transport model // Flow, Turbulence and Combustion. 2012. Vol. 88. No. 3. Pp. 431–449.
16. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 16.2. ANSYS Inc. 2015.
17. **Nikuradse J.** Untersuchungen über turbulente Strömungen in nicht kreisförmigen Rohren // Ingenieur-Archiv. 1930. Vol. 1. No. 3. Pp. 306–332.
18. **Melling A., Whitelaw J.H.** Turbulent flow in a rectangular duct // Journal of Fluid Mechanics. 1976. Vol. 78. No. 2. Pp. 289–315.
19. **Gessner F.B., Po J.K., Emery A.F.** Measurements of developing turbulent flow in a square duct // In: Durst F., Launder B.E., Schmidt F.W., Whitelaw J.H. (Eds.) Turbulent Shear Flows I. Berlin, Heidelberg: Springer, 1979. Pp. 119–136.

Статья поступила в редакцию 09.10.2017, принята к публикации 31.10.2017.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПАНОВ Дмитрий Олегович – инженер кафедры гидроаэродинамики, горения и теплообмена Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
doranov@gmail.com

РИС Владимир Вольдемарович – кандидат технических наук, директор НОЦ «Компьютерные технологии в аэродинамике и теплотехнике» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vvr@spbstu.ru

СМИРНОВ Евгений Михайлович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой гидроаэродинамики, горения и теплообмена Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
smirnov_em@spbstu.ru

REFERENCES

- [1] **N.N. Verevkin**, Gidravlicheskiye soprotivleniya izolirovannykh i sostavnykh kolen pryamougolnogo secheniya [Hydraulic resistances of isolated and miter bends with rectangular cross-sections], In: Industrial Aerodynamics: Air Ducts, Iss. 7, Moscow, Oborongiz (1956) 25–51.
- [2] **I.E. Idelchik**, Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Reference book on hydraulic resistances], Moscow, Mashinostroyeniye, 1975.
- [3] **D.O. Panov, A.D. Yukhnev**, Poteri davleniya v kanale s rezkim povоротом na 180°: rezultaty URANS i LES raschetov v сопоставlenii s dannymi izmereniy [Pressure losses in the duct turned sharply by 180 degrees: URANS & LES computation results as compared to the measurement data] // Trudy Yubileynoy konferentsii Natsionalnogo komiteta RAN po teplo- i massoobmenu «Fundamentalnyye i prikladnyye problemy teplomassoobmena» i XXI Shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov pod rukovodstvom akad. RAN A.I. Leontyeva «Problemy teplo- i massoobmena v energeticheskikh ustanovkakh». (May 22–26, 2017, St. Petersburg). In 2 vols. Vol. 1, Moscow, MEI Publishers (2017) 236–239.
- [4] **F. Nicoud, F. Ducros**, Subgrid-scale stress modeling based on the square of the velocity gradient tensor, Flow, Turbulence and Combustion. 62 (3) (1999) 183–200.
- [5] **S.C. Cheah, H. Iacovides, D.C. Jackson, et al.**, LDA investigation of the flow development through a rotating U-bend of strong curvature, In: The 5th International Symposium on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, Paris (1993) 269–276.
- [6] **S.C. Cheah, H. Iacovides, Jackson, et al.**, LDA investigation of the flow development through rotating U-ducts, ASME Journal of Turbomachinery. 108 (3) (1996) 590–596.
- [7] **H. Iacovides, D.C. Jackson, H. Ji, et al.**, LDA study of flow development through an orthogonally rotating U-bend of strong curvature and rib-roughened walls // ASME Journal of Turbomachinery. 118 (3) (1998) 386–391.
- [8] **Bo T., Iacovides H., Launder B.E.** Convective discretization schemes for the turbulence transport equations in flow predictions through sharp U-bends, International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow. 5 (1) (1995) 33–48.
- [9] **H. Iacovides, B.E. Launder, H.Y. Li**, The computation of flow development through stationary and rotating U-ducts of strong curvature, International Journal of Heat and Fluid Flow. 17 (1) (1996) 22–33.
- [10] **A.M. Levchenya, S.N. Lipnitskaya**, Optimizatsiya formy kanala kvadratnogo secheniya s povоротом na 180° s tselyu snizheniya poter: chislennoye modelirovaniye trekhmernogo turbulentnogo techeniya [Shape optimization for the duct with rectangular cross-section and turned sharply by 180 degrees in order to enhance losses: numerical simulation of 3D turbulent flow], Thermal Processes in Engineering. (12) (2011) 537–544.
- [11] **K. Suga**, Predicting turbulence and heat transfer in 3D curved ducts by near-wall second moment closures, International Journal of Heat Mass Transfer. 46 (1) (2003) 161–173.
- [12] **K.M. Guleren, A. Turan**, Validation of large-eddy simulation of strongly curved stationary and rotating U-duct flows, International Journal of Heat and Fluid Flow. 28 (5) (2007) 909–921.
- [13] **T.J. Craft, B.E. Launder**, A Reynolds-stress closure designed for complex geometries, International Journal of Heat and Fluid Flow. 17 (3) (1996) 245–254.
- [14] **M.L. Shur, P.R. Spalart, M.Kh. Strelets, A.K. Travin**, A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities, International Journal of Heat and Fluid Flow. 29 (6) (2008) 1638–1649.
- [15] **M.S. Gritskevich, A.V. Garbaruk, J. Schütze, F. Menter**, Development of DDES and IDDES formulations for the $k-\omega$ shear stress transport model, Flow, Turbulence and Combustion. 88 (3) (2012) 431–449.
- [16] ANSYS Fluent Theory Guide. Release 16.2. ANSYS Inc. 2015.

[17] **J. Nikuradse**, Untersuchungen über turbulente Strömungen in nicht kreisförmigen Rohren, *Ingenieur-Archiv*. 1 (3) (1930) 306–332.

[18] **A. Mellling, J.H. Whitelaw**, Turbulent flow in a rectangular duct, *Journal of Fluid Mechanics*. 78 (2) (1976) 289–315.

Received 09.10.2017, accepted 31.10.2017.

[19] **F.B. Gessner, J.K. Po, A.F. Emery**, Measurements of developing turbulent flow in a square duct // In: F. Durst, B.E. Launder, F.W. Schmidt, J.H. Whitelaw (Eds), *Turbulent Shear Flows, I.*, Springer, Berlin, Heidelberg (1979) 119–136.

THE AUTHORS

PANOV Dmitriy O.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
 dopanov@gmail.com

RIS Vladimir V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
 vvrisk@spbstu.ru

SMIRNOV Evgeniy M.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
 smirnov_em@spbstu.ru