

## РАСЧЕТ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ДИФFUЗОРЕ НА ОСНОВЕ ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕГО ПОДХОДА

© 2013 Е.И. Куркин, А.С. Ляскин, В.Г. Шахов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева  
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 02.12.2013

На основе вихреразрешающего подхода описана методика расчета течений внутри диффузора с углом раскрытия  $10^\circ$  и вращающимися стенками. Приведено сравнение результатов расчетов с помощью RANS и LES моделей с экспериментальными данными.

Ключевые слова: вихреразрешающий подход, диффузор, вращающаяся стенка.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Отрыв потока в диффузоре – одна из основных причин снижения его эффективности. Это, в частности, не позволяет использовать в энергомашиностроении диффузоры с углом раскрытия больше  $6-8^\circ$ , что приводит к росту габаритов газодинамических установок.

Проведенное в [1] моделирование пограничного слоя в осесимметричном диффузоре показало возможность устранения отрыва потока путем закрутки диффузора в осевом направлении, что также подтверждается расчетом в ANSYS CFX. Для устранения отрыва турбулентного потока требуются меньшие скорости вращения диффузора по сравнению с ламинарным случаем. Алгебраическая модель турбулентности дает большие значения поверхностных напряжений трения и большие значения продольной координаты точки отрыва потока.

Изучен поток внутри диффузора с углом раскрытия  $10^\circ$  и на его выходе при числе Рейнольдса  $Re = 4,8 \cdot 10^4$ , отнесенным к скорости потока и диаметру на входе в диффузор. Диаметр диффузора на входе равен 50 мм, на выходе – 100 мм, длина диффузора – 287 мм.

Выбор модели турбулентности существенным образом сказывается на моделировании течения в диффузоре и на его выходе. На рис. 1 представлено сравнение исследования вращающегося диффузора с помощью SST (рис. 1 а) и  $\nu 2f$  (рис. 1 б) RANS моделей турбулентности. Вид-

но, что полученные на основе различных моделей турбулентности решения имеют качественные отличия – наблюдается размытие струи на выходе из диффузора при использовании SST модели, тогда как при использовании  $\nu 2f$  модели турбулентности размытия струи не происходит.

Столь существенное отличие в результатах моделирования при использовании различных RANS моделей турбулентности делает актуальной задачу более глубокого исследования турбулентного потока у стенок вращающегося диффузора с применением вихреразрешающих моделей турбулентности.

### 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСШТАБОВ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

Воспользуемся построенным RANS решением для задачи о течении во вращающемся диффузоре для определения масштабов дискретизации расчетной области, необходимых для разрешения крупно вихревых структур.

Интегральный масштаб, рассчитан по формуле  $\ell_\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$ , где  $k$  – энергия турбулентности,

$\varepsilon$  – диссипация турбулентности. Критерий размера ячеек расчетной сетки для разрешения крупно вихревых структур, рассчитанный на основе

интегрального масштаба  $\Delta_{\ell_\varepsilon} < \frac{\ell_\varepsilon}{12}$ , приведён на

рис. 2 а.

Масштаб Колмогорова рассчитан по форму-

ле  $\eta = \left( \frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}$ , где  $\nu$  – кинематическая вязкость.

Критерий размера ячеек расчетной сетки для разрешения крупно вихревых структур, рассчитан-

*Куркин Евгений Игоревич, инженер кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов.*

*E-mail: eugene.kurkin@mail.ru*

*Ляскин Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: alyaskin@mail.ru*

*Шахов Валентин Гаврилович, кандидат технических наук, профессор кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: shakhov@ssau.ru*

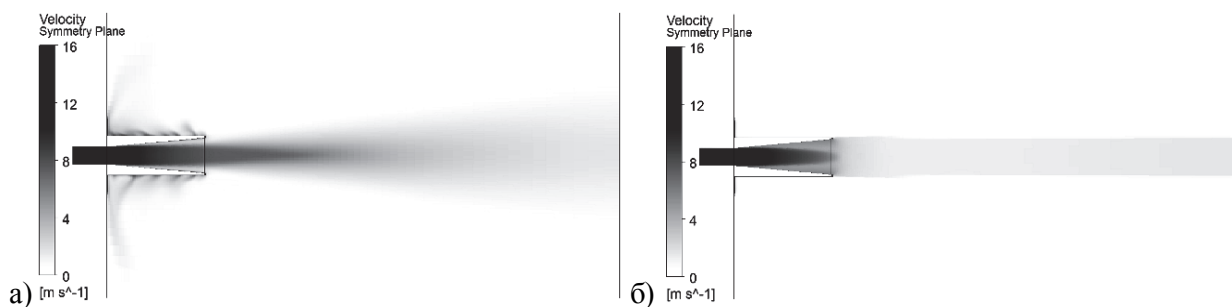


Рис. 1. Поле скорости, полученное по результатам сравнения SST (а) и v2f (б) моделей турбулентности,  $\omega = 0$

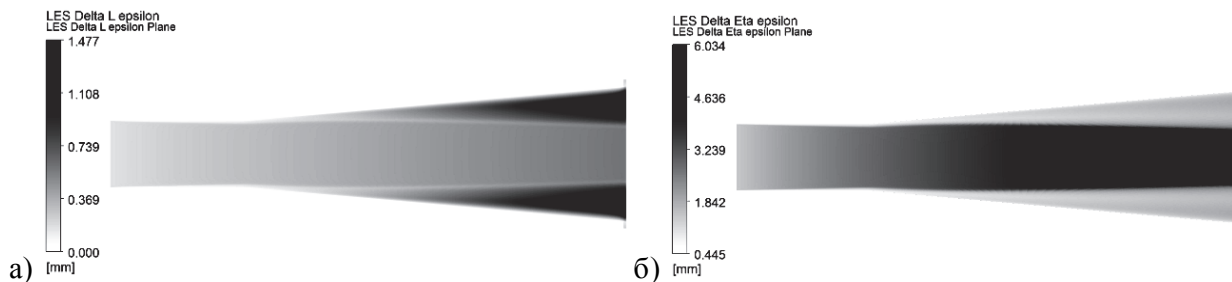


Рис. 2. Критерий максимального размера ячеек на основе а) интегрального масштаба, б) масштаба Колмогорова,  $\omega = 3200 \text{ об/мин}$

ный на основе масштаба Колмогорова  $\Delta_\eta < 25\eta$  представлен на рис. 2б.

По интегральному критерию (рис. 2а) размер ячеек должен быть порядка 0,5 мм внутри диффузора и не более 1,5 мм на его выходе около стенок. По критерию Колмогорова (рис. 2б) ячейки должны иметь размер не более 2 мм в цилиндрическом участке до диффузора, не более 1 мм в пограничном слое на выходе из диффузора, не более 5 мм в ядре потока.

Полученные значения размеров ячеек от 0,5 мм до 2 мм около стенок диффузора хорошо соответствуют определению размеров расчетных ячеек на основании значения безразмерного расстояния до стенки  $y^+$ . При толщине пристенной ячейки на выходе из диффузора 0,3 мм получаем  $y^+ = 12$ . Поэтому, для достижения величины  $y^+ \approx 1$  необходимо задавать толщину пристенной ячейки  $\Delta_y \approx 0,025 \text{ мм}$ , что соответствует длине ячейки 1,25 мм при условии  $\Delta_x = 50\Delta_y$ .

Значения длины ячеек расчетной области, необходимых для разрешения крупновихревых структур, задаваемые описанными выше соотношениями, составляют около 1 мм. Примем  $\Delta_x = 1 \text{ мм}$  для LES области расчетной сетки при исследовании течения внутри вращающегося диффузора. Толщину пристенной ячейки  $\Delta_y$  для обеспечения  $y^+ \approx 1$  примем равной 0,025 мм.

Для разбиения расчетной сетки LES области в окружном направлении выберем шаг в  $1^\circ$ , что обеспечит размер ячеек на выходе из диффузора не более 0,87 мм, что также близко к 1 мм для размера ячейки поперек потока  $\Delta_z$ .

### 3. ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ

Задача моделирования течения во вращающемся диффузоре решается методом конечных объемов в системе ANSYS CFX. Метод конечных объемов требует создания расчетной сетки, для ее построения используется ANSYS ICEM CFD. Все расчетные сетки имеют блочную структуру и состоят из элементов гексагональной формы.

Для решения задачи используется зональная LES модель, поэтому расчетная сетка разделена на три части: 1 - сетка для RANS области на входе в диффузор, 2 - сетка для LES области в диффузоре, 3 - сетка для RANS области на выходе из диффузора (рис. 3).

Сетка RANS области, расположенная на входе в диффузор, занимает половину длины цилиндрической трубы диаметром 50 мм и длиной 100 мм перед его входом и содержит 416 250 элемента.

Сетка LES области включает в себя вторую половину цилиндрической проставки перед диффузором, диффузор, а также область на выходе из диффузора длиной 500 мм и диаметром 400 мм и состоит из 54 011 700 элементов гексагональной формы. Для удовлетворения требований LES модели сетка удовлетворяет описанным выше условиям - средний размер ячеек сетки равен 1 мм, а толщина пристеночных ячеек лежит в диапазоне от 0,008 мм до 0,02 мм.

При тестовых расчетах на режиме вращающейся стенки диффузора возникала неустойчивость решения, связанная с погрешностями автоматической генерации сетки. Для повышения

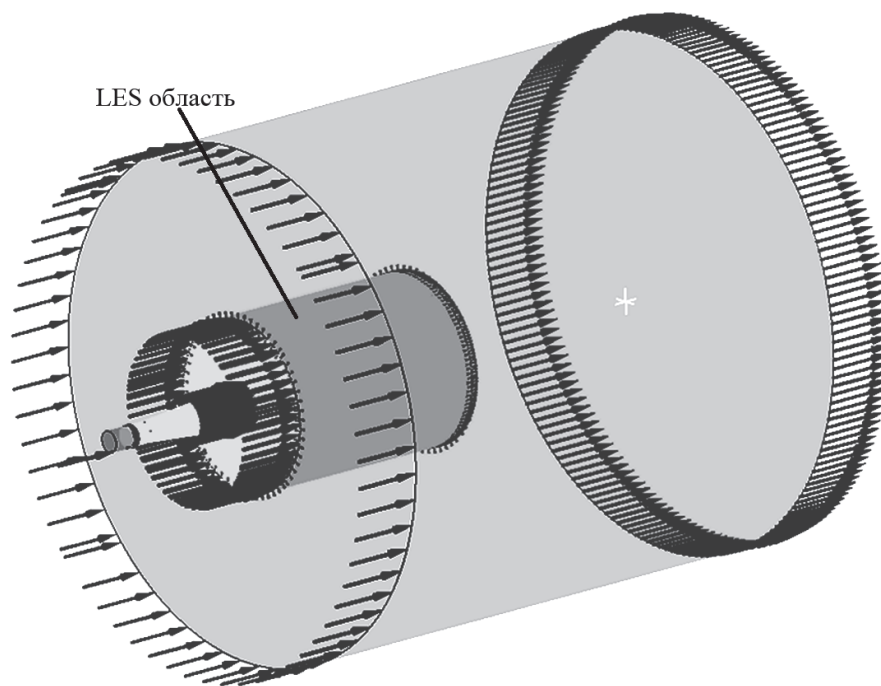


Рис. 3. Общий вид расчетной сетки и расположение LES области

вычислительной устойчивости ячейки на выходе из диффузора были вручную исправлены, что обеспечило точность задания нормалей всех ячеек и качество сетки, более чем 0,7 по критерию ANSYS ICEM CFD.

Сетка на выходе из LES области имеет длину 1,21 м, внешний диаметр 1,2 м и состоит из 3 543 750 элементов.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКА ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ДИФFUЗОРЕ С ПОМОЩЬЮ LES МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

С учетом требований по описанию крупновихревых структур расчетная область содержит 58 млн. элементов гексагональной формы. Расчет проведен методом контрольных объемов в системе ANSYS CFX. Для расчетов использован суперкомпьютер «Сергей Королев» (Самара, СГАУ), в котором было использовано от 16 до 32 узлов по 8 процессоров и 12 Гб оперативной памяти в каждом.

Расчет задачи с использованием LES модели турбулентности проводился в три этапа:

1. Расчет приближения нулевого шага по времени, как решение задачи в стационарной постановке с использованием RANS модели турбулентности.
2. Расчет нестационарного решения с использованием LES модели турбулентности длительностью порядка 2 времён прохождения потоком LES области для распространения и развития крупновихревых структур турбулентного течения.
3. Расчет нестационарного LES решения с осреднением параметров потока.

Расчет приближения нулевого шага по времени, как решение задачи в стационарной постановке с использованием RANS модели турбулентности (SST модель), представлен на рис. 4. Для расчета нестационарного решения с использованием LES модели турбулентности определен шаг по времени таким образом, чтобы число Куранта, равное отношению длины ячейки к пути частиц за один шаг по времени, было приблизительно равно единице.

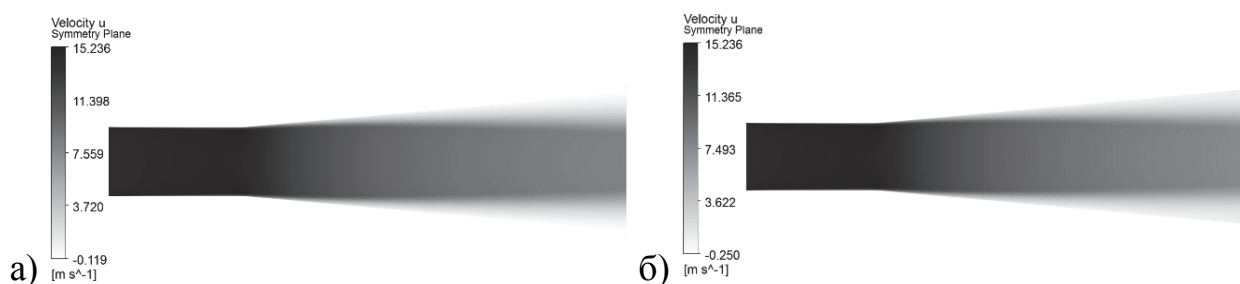


Рис. 4. Поле скорости в диффузоре, рассчитанное с помощью RANS SST модели турбулентности, а)  $\omega = 0$ , б)  $\omega = 3200$  об/мин

Скорость в диффузоре изменяется в пределах от 14,4 м/с на входе, до 3,6 м/с на выходе. С учетом определенного ранее среднего размера ячейки вдоль потока 1 мм и числе Куранта, равном 1, шаг по времени должен составлять от  $0,7 \cdot 10^{-4}$  с до  $2,7 \cdot 10^{-4}$  с. Для первого расчета с LES моделью турбулентности принято решение использовать шаг по времени  $1 \cdot 10^{-4}$  с с целью распространения и развития крупновихревых структур турбулентного течения.

Время прохождения потоком диффузора оценено в 0,05 с. Общее время прохождения LES области расчетной сетки составляет примерно 0,2 с. В качестве времени накопления и развития крупновихревых структур было принято 0,2 с, что составляет 3000 шагов по времени и равно 6 временам прохождения потока внутри диффузора.

Мгновенные поля скоростей после 3000 шагов по времени с использованием LES моделей турбулентности представлены на рис. 5.

После накопления крупновихревых структур турбулентности по результатам вычисления мгновенного поля скорости число Куранта было уточнено. В большинстве точек потока внутри диффузора число Куранта не превышает двух. По результатам проведена коррекция шага по времени, который для дальнейших расчетов принят  $0,5 \cdot 10^{-4}$  с.

Мгновенные поля скоростей после развития

крупновихревых структур турбулентности приняты за начальные приближения для моделирования потока в диффузоре с использованием LES модели турбулентности с осреднением параметров потока. Длительность моделирования составляла 0,05 с, что соответствовало времени одного прохождения потока по длине диффузора и равнялось 1000 шагам по времени, равным  $0,5 \cdot 10^{-4}$  с.

Чтобы убедиться в том, что выбранное время накопления статистики достаточно для получения средних значений результатов моделирования на основе LES модели турбулентности проверялась повторяемость получения результатов. Мгновенное поле скоростей после повторного прохождения третьего этапа решения представлено на рис. 6, усредненное поле скоростей – на рис. 7.

Сравнивая значения скоростей на оси диффузора (рис. 8), отметим хорошую повторяемость результатов и достаточное время осреднения параметров потока при исследовании полей скоростей внутри диффузора при  $x < 200$  мм при  $\omega = 0$  и  $x < 250$  мм при  $\omega = 3200$  об/мин. Отметим в связи с этим, что для изучения течения на выходе из каналов с использованием LES моделей турбулентности предпочтительно осреднение параметров потока во времени, превышающем в 1,5 раза время прохождения потока через канал.

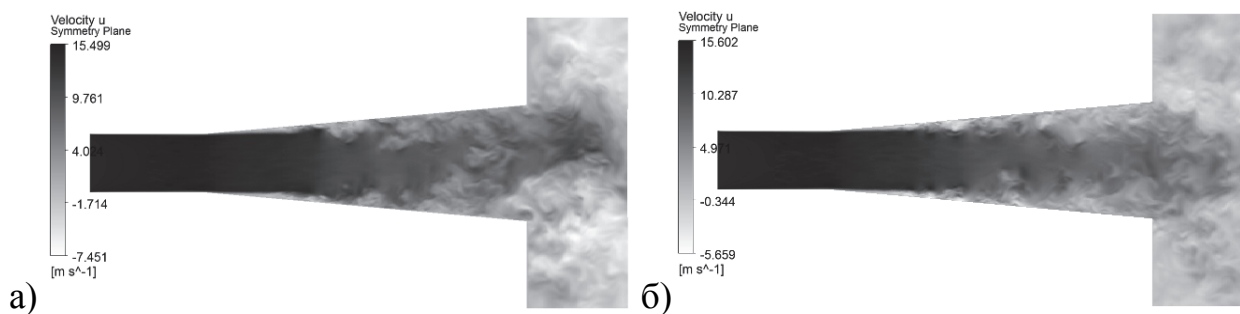


Рис. 5. Мгновенное поле скоростей после развития крупновихревых структур турбулентности, а)  $\omega = 0$  об/мин, б)  $\omega = 3200$  об/мин

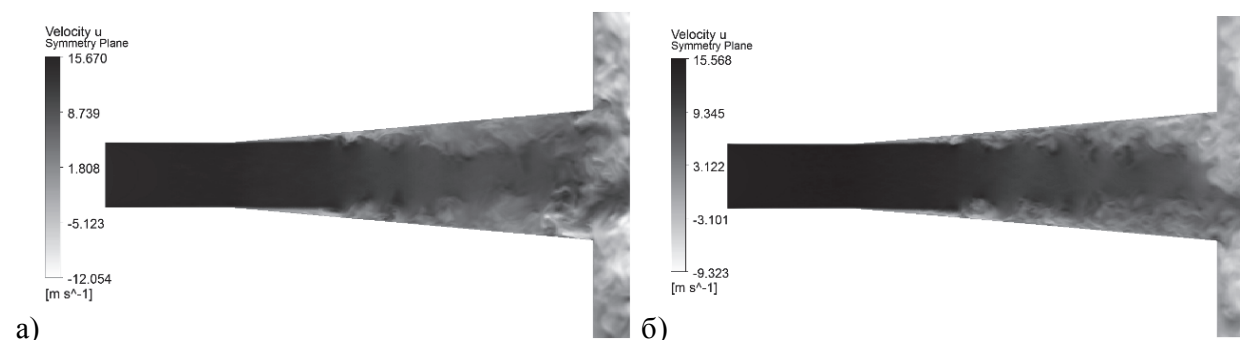


Рис. 6. Мгновенное поле скоростей после второго накопления статистики для LES модели турбулентности, а)  $\omega = 0$  об/мин, б)  $\omega = 3200$  об/мин

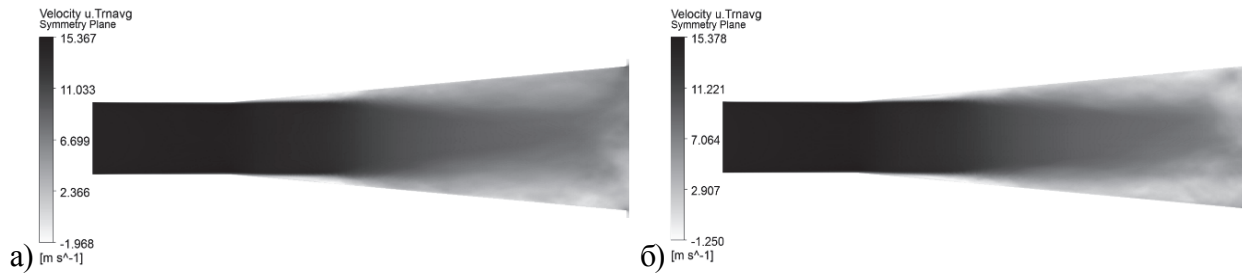


Рис. 7. Усредненное поле скоростей второго накопления статистики для LES модели турбулентности, а)  $\omega = 0$  об/мин, б)  $\omega = 3200$  об/мин

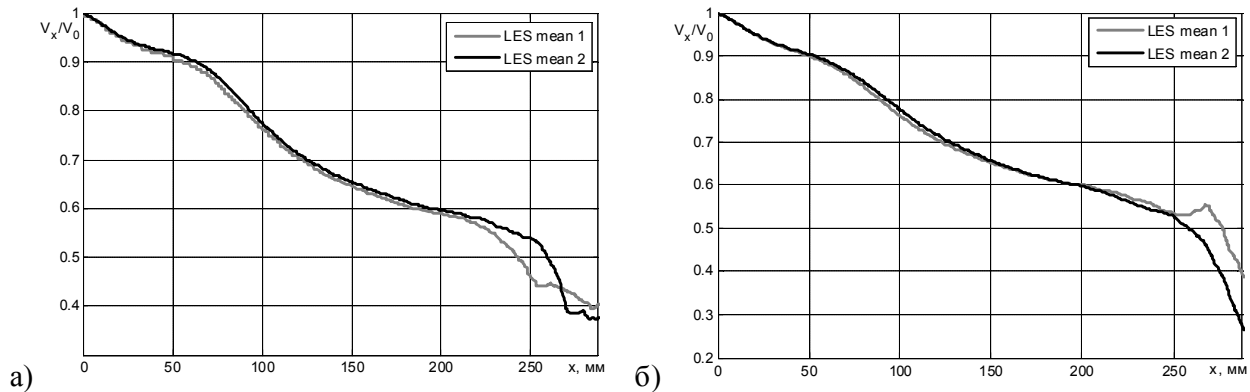


Рис. 8. Сравнение усредненных скоростей на оси диффузора для первого и второго накопления статистики LES модели турбулентности, а)  $\omega = 0$  об/мин, б)  $\omega = 3200$  об/мин

### 5. СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОТОКА ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ДИФфуЗОРЕ

Результаты вычисления скорости с помощью RANS и LES моделей турбулентности сравнивались с экспериментальными данными. Основным методом исследования является PIV метод [2] измерения скорости потока по изображениям частиц, реализуемый на основе установки фирмы Dantec Dynamics. Проведение эксперимента и полученные результаты подробно описаны в работе [3].

Сравнение относительных профилей скорости при  $x = 145$  мм, полученных эксперимен-

тально и расчетом с помощью SST и LES моделей турбулентности, представлено на рис. 9. На рис. 10 представлено сравнение результатов расчета и экспериментального исследования относительной скорости на оси диффузора.

Экспериментальные профили скорости, представленные на рис. 10, выглядят сжатыми к оси диффузора, что может быть обусловлено влиянием оптических искажений, вызванных кривизной стенок диффузора. Качественно LES модель турбулентности описывает профили скорости лучше, чем RANS SST модель, давая меньший диаметр ядра потока и более плавный переход скорости от области пограничного слоя к ядру.

Для исследования отрывных явлений особый

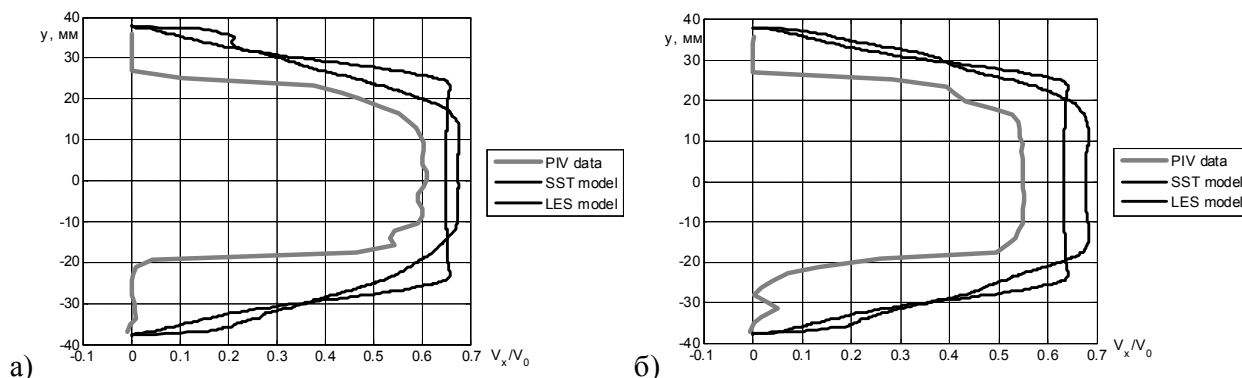


Рис. 9. Профиль скорости внутри диффузора при  $x = 145$  мм, а)  $\omega = 0$  об/мин, б)  $\omega = 3200$  об/мин

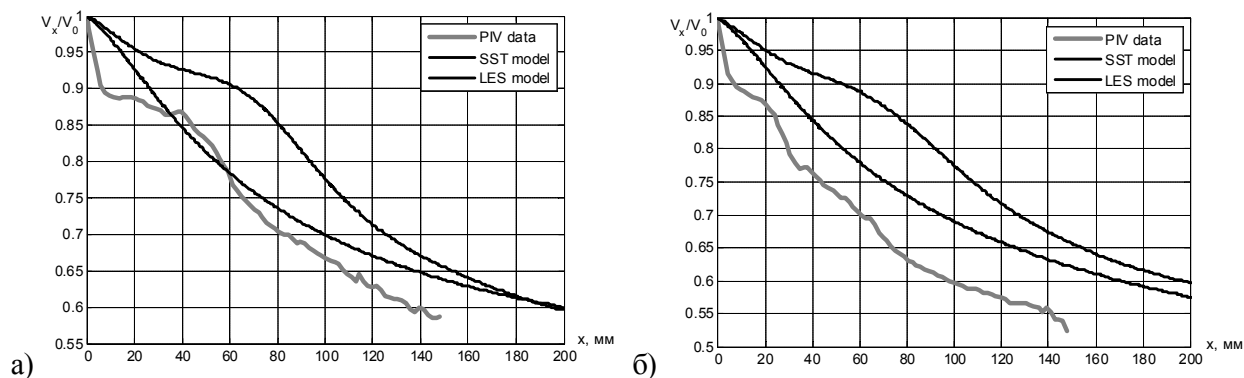


Рис. 10. Скорость на оси диффузора без вращения, а)  $\omega = 0$  об/мин, б)  $\omega = 3200$  об/мин

интерес представляет пристенная область потока в канале с подвижными стенками. Учитывая сложность экспериментального исследования этой области, даже с использованием современных PIV методов, можно говорить о необходимости использования вихререзающих моделей турбулентности для более глубокого исследования отрывных течений в каналах с подвижными стенками.

По распределениям скорости вдоль оси видно (рис. 10), что LES, в отличие от RANS, воспроизводит немонотонный характер изменения скорости, который наблюдается в эксперименте, но не наблюдается в расчетах с RANS моделью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куркин Е.И., Шахов В.Г. Расчет пограничного слоя внутри осесимметричных каналов при их осевом вращении в системе MATLAB // Труды IV всероссийской научной конференции "Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB", Астрахань: Изд. дом "Астраханский университет", 2009. С.186-201.
2. Методы оптической диагностики в аэрофизическом эксперименте / В.М. Бойко, А.М. Оришчи, А. А. Павлов, В.В. Пикалов. Новосибирск: НГУ, 2009. 450 с.
3. Куркин Е.И. Экспериментальное исследование течения внутри вращающегося осесимметричного диффузора // Научное обозрение. 2013. №9. С. 78-84.

## STUDY OF TURBULENT FLOW IN ROTATING DIFFUSER BASED ON LES APPROACH

© 2013 E.I. Kurkin, A.S. Ljaskin, V.G. Shakhov

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

Method for calculating flows in channels with a rotating wall based on LES approach was described. The flow inside the diffuser with an opening angle of  $10^\circ$  and rotating walls was studied. The results of computations using RANS and LES models with experimental data was compared.

Keywords: LES, diffuser, rotating wall.

Eugeniy Kurkin, Engineer of Aircraft Construction and Design Department. E-mail: eugene.kurkin@mail.ru

Anton Lyaskin, Candidate of Technics, Associate Professor at the Aircraft Construction and Design Department.

E-mail: alyaskin@mail.ru

Valentin Shakhov, Candidate of Technics, Professor at the Aircraft Construction and Design Department.

E-mail: shakhov@ssau.ru