

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

### ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИЙ ПОДХОД ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ДИФFUЗОРЕ

Использование диффузоров с углом раскрытия больше 6-8° затруднительно в связи с отрывом потока, резко снижающим его эффективность, что приводит к невозможности уменьшения габаритов газодинамических установок. Моделирование пограничного слоя [1], а также расчеты авторов в ANSYS CFX показали возможность устранения отрыва потока путем закрутки диффузора в осевом направлении. В работе изучен поток внутри диффузора с углом раскрытия 10° и на его выходе при числе Рейнольдса  $Re = 4,8 \cdot 10^4$ , рассчитанном по 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. При использовании  $k-\omega$  SST модели турбулентности наблюдается размытие струи на выходе из диффузора, тогда как при использовании  $v2f$  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 вихре-разрешающих моделей турбулентности. Определение масштабов дискретизации расчетной области, необходимых для разрешения крупновихревых структур, выполнено при предварительном решении задачи с использованием RANS моделей турбулентности.

По интегральному критерию (рис. 1а)  $\Delta_{l_\varepsilon} < \frac{1}{12} l_\varepsilon$ , где  $l_\varepsilon = k^{3/2} \varepsilon^{-1}$  - интегральный масштаб турбулентности,  $k$  - энергия турбулентности,  $\varepsilon$  - диссипация турбулентности, длина ячеек должна быть от 0,5 мм до 1,5 мм. По критерию Колмогорова (рис. 1б)  $\Delta_\eta < 25\eta$ , где  $\eta = \nu^{3/4} \varepsilon^{-1/4}$  - масштаб Колмогорова,  $\nu$  - кинематическая вязкость, ячейки должны иметь длину 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. Длина ячеек от 0,5 мм до 2 мм около стенок диффузора хорошо соответствуют размерам длине, определенной на основании значения безразмерного расстояния до стенки  $y^+$ . Величина  $y^+ = 1$  достигается при толщине пристенной ячейки  $\Delta_y = 0,025$  мм и соответствует длине ячейки 1,25 мм при условии  $\Delta_x = 50\Delta_y$ .

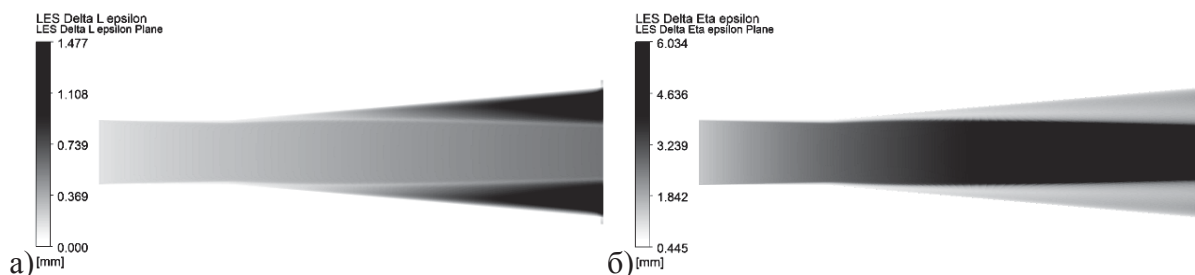


Рисунок 1 – Критерий максимального размера ячеек на основе: а) интегрального масштаба, б) масштаба Колмогорова,  $\omega = 3200$  об/мин

Обобщая результаты определения длины ячеек LES области расчетной сетки разными методами, примем  $\Delta_x = 1$  мм. Толщина пристенной ячейки равна 0,025 мм. Для разбиения LES области в окружном направлении выбран шаг в  $1^\circ$ , обеспечивший размер ячеек на выходе из диффузора не более 0,87 мм.

Задача моделирования течения во вращающемся диффузоре решена методом конечных объемов в системе ANSYS CFX на суперкомпьютере «Сергей Королев» (Самара, СГАУ), в котором задействовано от 16 до 32 узлов по 8 процессоров и 12 Гб оперативной памяти в каждом. Все расчетные сетки построены в ICEM CFD, имеют блочную структуру и состоят из элементов гексагональной формы.

Для решения задачи используется зональная LES модель. Расчетная сетка разделена на три части: сетка для RANS области на входе в диффузор, сетка для LES области в диффузоре, сетка для RANS области на выходе из диффузора. Сетка RANS области на входе в диффузор занимает половину длины цилиндрической проставки (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 описанного выше размера. При тестовых расчетах на режиме вращающейся стенки диффузора возникала неустойчивость решения, связанная с погрешностями автоматической генерации сетки. Для повышения вычислительной устойчивости ячейки на выходе из диффузора были исправлены вручную, что обеспечило точность задания нормалей всех ячеек и качество сетки по критерию ANSYS ICEM CFD более чем 0,7. RANS сетка на выходе из LES области имеет длину 1,21 м, внешний диаметр 1,2 м и состоит из 3 543 750 элементов.

Расчет задачи проводился в три этапа: расчет приближения нулевого шага по времени, как решение задачи в стационарной постановке с использованием RANS модели турбулентности, расчет нестационарного решения с использованием зональной LES модели турбулентности длительностью порядка двух времен прохождения потоком LES области

для распространения и развития крупновихревых структур турбулентного течения и расчет нестационарного зонального LES решения с осреднением параметров потока (рис. 2).

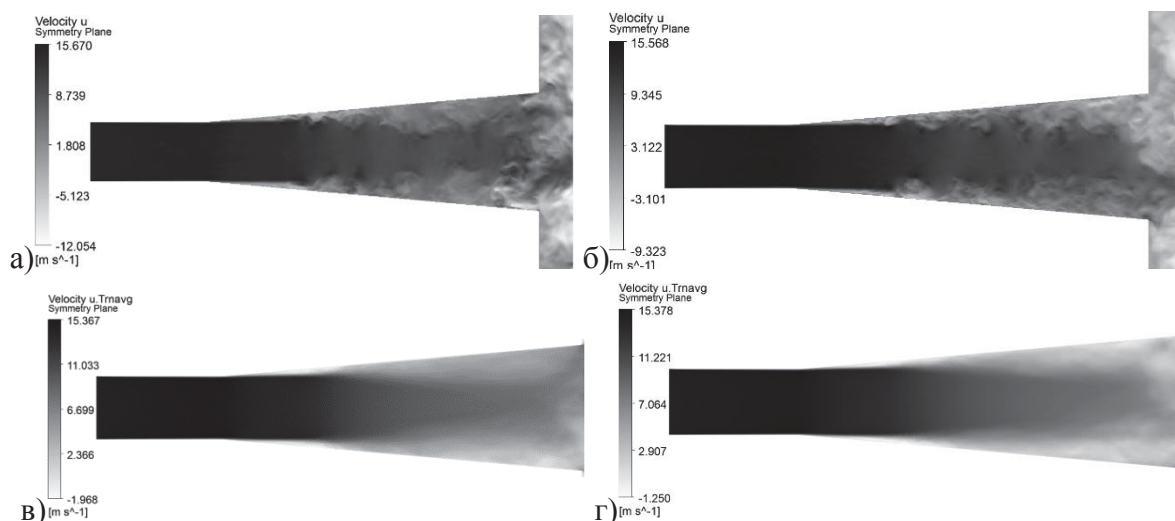


Рисунок 2 – Мгновенные (а, б) и усредненные (в, г) поля скоростей после второго накопления статистики для LES модели турбулентности: а, в)  $\omega = 0$  об/мин, б, г)  $\omega = 3200$  об/мин

Сравнение значения скоростей на оси диффузора показало хорошую повторяемость результатов и достаточное время осреднения параметров потока при исследовании полей скоростей внутри диффузора для  $x < 200$  мм при  $\omega = 0$  и  $x < 250$  мм при  $\omega = 3200$  об/мин.

Результаты вычисления скорости с помощью RANS и LES моделей турбулентности сравнивались с экспериментальными данными, полученными PIV методом измерения скорости потока по изображениям частиц на установке фирмы Dantec Dynamics [2].

По распределениям скорости вдоль оси видно (рис. 3), что LES модель, в отличие от RANS модели, более точно воспроизводит характер изменения спада скорости, который наблюдается в эксперименте, но не наблюдается в расчетах с RANS моделью.

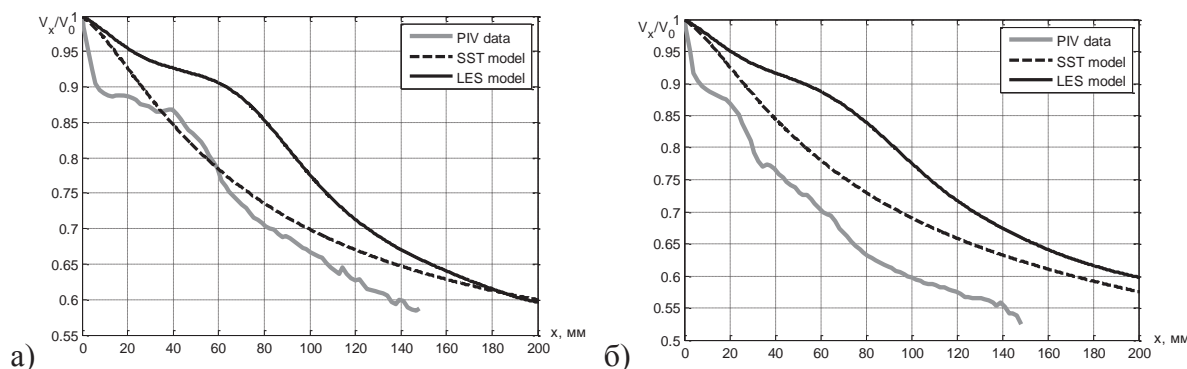


Рисунок 3 – Скорость на оси диффузора: а)  $\omega = 0$  об/мин, б)  $\omega = 3200$  об/мин

Экспериментальные профили скорости (рис. 4) 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.

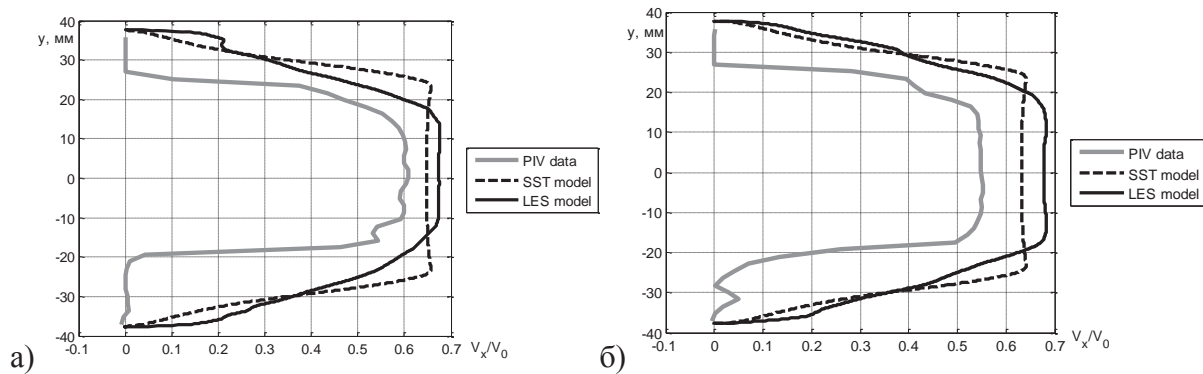


Рисунок 4 – Профиль скорости в диффузоре,  $x = 145$  мм: а)  $\omega = 0$  об/мин, б)  $\omega = 3200$  об/мин

Для исследования отрывных явлений особый 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 применения вихреразрешающих моделей турбулентности для более глубокого исследования отрывных течений в каналах с подвижными стенками.

#### Библиографический список

- 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 Куркин Е.И. Экспериментальное исследование течения внутри вращающегося осесимметричного диффузора // Научное обозрение. №9, 2013. С. 78-84.