

УДК 681.121.842+532.5

© Р. А. Тырышкин, А. Н. Сабирзянов, В. А. Фафурин, В. В. Фефелов,
В. Б. Явкин

ПРИМЕНЕНИЕ RANS МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА В РАСХОДОМЕРЕ СО СТАНДАРТНОЙ ДИАФРАГМОЙ

Представлены результаты исследования возможности применения RANS моделей турбулентности для описания структуры потока в измерительном трубопроводе со стандартной диафрагмой и расчета коэффициента расхода с точностью, регламентированной стандартом. Показано влияние параметров сетки на точность расчета и сформулированы рекомендации по сгущению сетки в пристеночных областях. Представлены зависимости протяженности отрывных зон от числа Рейнольдса. Установлены диапазоны по числу Рейнольдса применимости различных RANS моделей турбулентности для определения коэффициента расхода с погрешностью, удовлетворяющей требованиям стандарта.

Ключевые слова: модель турбулентности, коэффициент расхода, диафрагма, вычислительная гидродинамика, структура потока.

Корректный расчет метрологических характеристик расходомеров переменного перепада давления (РППД) определяет необходимость детального знания структуры потока, что неразрывно связано с экспериментальными и численными исследованиями рециркуляционных зон. Постоянное ужесточение требований к точности измерения расхода требует периодической ревизии стандартов, для которой на сегодняшний день единственным достоверным средством является проведение испытаний, что зачастую оказывается слишком дорогостоящим или невозможным мероприятием при особенно высоких числах Рейнольдса.

Как правило, наибольшее внимание уделяется исследованиям основного вихря за диафрагмой. Данные о угловом вихре за диафрагмой, как и данные об вихревой структуре перед диафрагмой, носят качественный характер. Геометрические параметры вихревых структур и их зависимости от числа Рейнольдса отсутствуют.

Современное состояние в области расчетов турбулентных течений характеризуется большим числом RANS моделей турбулентности, ни одна из которых не является универсальной и удовлетворительно работает только в определенном классе задач. Возможность применения вычислительной гидродинамики (CFD) для расчета метрологических характеристик РППД рассматривалась в работе [1]. Однако систематические исследования влияния моделей турбулентности на правильность передачи структуры потока в измерительном трубопроводе (ИТ) и точность расчета метрологических характеристик отсутствуют. Применение CFD для анализа метрологических характеристик расходомеров ограничивается необходимостью получения результатов с высокой точностью, которая определяется методической погрешностью, регламентированной ГОСТом [2]. В работе [3] показано, что требуемая точность может быть достигнута при правильном выборе модели турбулентности и построении сетки с обоснованным выделением пристеночных областей. Вопрос о выборе модели турбулентности, позволяющей адекватно описать структуру потока в трубопроводе со стандартной диафрагмой при различных параметрах течения и рассчитать коэффициент расхода с требуемой точностью, остается открытым. Следует отметить, что при очень жестких требованиях к точности расчета необходимо обеспечение сеточной независимости решения.

В данной работе проведено исследование применимости двухпараметрических моделей турбулентности $k-\varepsilon$, модели переноса сдвиговых напряжений SST $k-\omega$ и однопараметрической модели Спалларта–Аллмараса (S-A) для адекватного описания структуры потока в зоне рециркуляции ИТ, расчета коэффициента расхода с точностью, регламентированной стандартом [2],

установления влияния параметров сетки на точность расчета. В исследуемых моделях использовался стандартный набор констант. В моделях турбулентности κ - ε исследовалась возможность применения стандартной и улучшенной процедур расчета пристеночных функций.

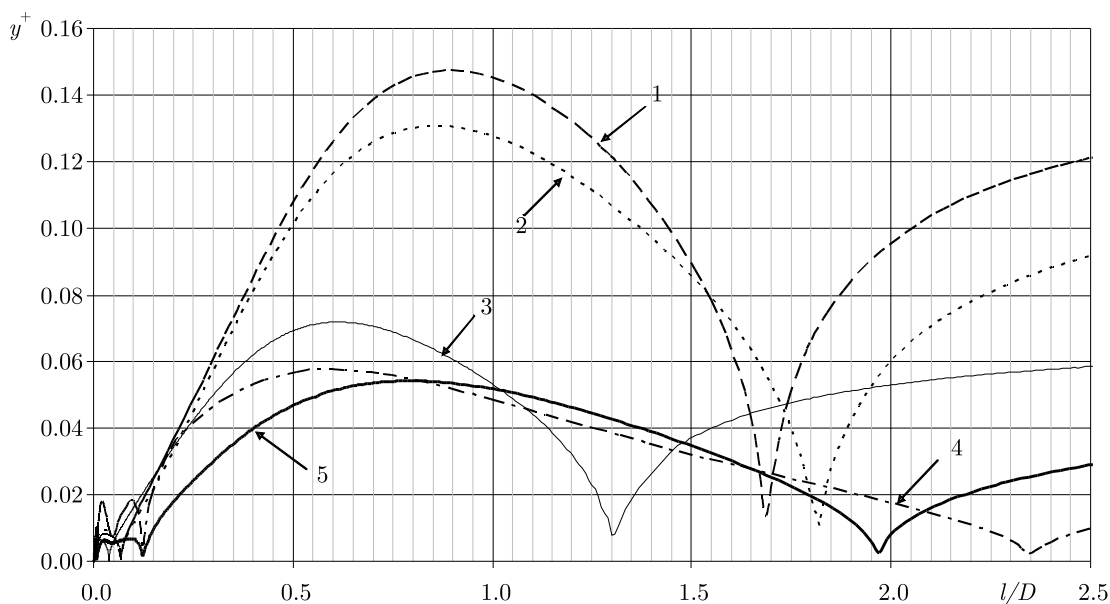


Рис. 1. Изменения y^+ на стенке ИТ после диафрагмы при $Re = 3,2 \cdot 10^5$ для $\beta = 0,75$: 1 — realizable κ - ε (SWF), $h_{y1}/D = 1,21 \cdot 10^{-5}$; 2 — RNG κ - ε (SWF), $h_{y1}/D = 1,21 \cdot 10^{-5}$; 3 — стандартная κ - ε (SWF), $h_{y1}/D = 6,05 \cdot 10^{-6}$; 4 — S-A, $h_{y1}/D = 6,05 \cdot 10^{-6}$; 5 — SST κ - ω , $h_{y1}/D = 6,05 \cdot 10^{-6}$

Исследовалось стационарное несжимаемое изотермическое течение жидкости в осесимметричной постановке средствами программного продукта Fluent. Рассматривались два ИТ с относительным диаметром $\beta = 0,75$ и $0,567$ ($\beta = d/D$, где d и D — соответственно диаметры диафрагмы и трубопровода). Геометрические характеристики ИТ, размеры и расположение отверстий для отбора давления выбраны согласно стандарту [2]. Границы расчетной области и сама расчетная сетка строились средствами сеточного генератора Gambit. Использовались сетки с прямоугольной формой ячеек, ориентированной вдоль стенок, и гибридные, содержащие как прямоугольные, так и треугольные ячейки. В процессе решения проводилась адаптация пристеночных областей. В итоге моделирование осуществлялось на 26 вариантах сеток, в которых относительный поперечный размер первой пристеночной ячейки h_{y1}/D изменялся от $7,26 \cdot 10^{-5}$ до $4,73 \cdot 10^{-8}$. Соответственно, общее число расчетных ячеек менялось от $2,1 \cdot 10^5$ до $1,3 \cdot 10^6$.

В качестве граничных условий на входе в ИТ задавались профили продольной и радиальной скорости и параметров турбулентности, соответствующие развитому течению. Для получения профиля проводились расчеты течения в длинной трубе постоянного сечения с однородными граничными условиями на входе. На выходе в поперечном сечении ставилось условие постоянства давления. На стенке ставились условия прилипания и непротекания, а также условия симметрии на оси канала. Моделирование осуществлялось с использованием полуявного метода SIMPLE, схем I и II порядка аппроксимации исходных уравнений. Условие окончания счета — неизменность осредненного статического давления в местах его замера и «невязок» уравнений.

При моделировании течения в ИТ с $\beta = 0,567$ в широком диапазоне чисел Рейнольдса в решении существуют установившиеся незначительные флуктуации контролируемых параметров. При высоких числах Re для ИТ с $\beta = 0,567$ решение не сходится по большинству моделей. Для $\beta = 0,75$ практически во всем диапазоне Re все модели турбулентности имеют решение, которое хорошо сходится. Исключение — $Re > 4,8 \cdot 10^7$. С уменьшением размера сетки

флуктуации в решении увеличиваются. Наиболее значительные флуктуации наблюдаются для моделей RNG κ - ε , SST κ - ω и S-A.

Структура потока для различных β отличается. Например, для $\beta = 0,567$ практически все модели турбулентности предсказывают вихрь на наклонной поверхности диафрагмы в широком диапазоне Re . Модель SST κ - ω определяет его размер существенно больше. Для $\beta = 0,75$ модели турбулентности не предсказывают наличие подобных вихрей.

Рассмотренные модели турбулентности дают разную структуру потока. Различие проявляется как в форме линий тока, так и в размерах вихрей, а также в определении расстояния до точки присоединения основного вихря за диафрагмой. Кроме основного вихря, обнаружен каскад угловых вихрей за диафрагмой, причем число вихрей различно для разных моделей.

Модели турбулентности с существенным расхождением определяют точку присоединения основного вихря, протяженность которого изменяется от $l/D = 1,3$ (где l — длина вихря) для стандартной κ - ε модели со стандартной пристеночной функцией (SWF) до $l/D = 2,3$ для S-A модели. Все модели определяют наличие как минимум 3-х вихрей за диафрагмой. Модели RNG κ - ε (SWF) и realizable κ - ε (SWF) приблизительно одинаково определяют положение точки присоединения углового вихря и с незначительной разницей положение точки присоединения вторичного углового вихря, который занимает крайнее угловое положение у диафрагмы. В то же время точка присоединения основного вихря определяется этими моделями с существенным расхождением. Модель S-A предсказывает наибольшую протяженность вторичного углового вихря, а также то, что на месте углового вихря располагаются два. Структура потока, описанная моделью SST κ - ω , соответствует структуре, полученной по модели S-A. Существенной разницей является то, что отсутствует деление углового вихря, предсказанное моделью S-A. В качестве иллюстрации на рис. 1 представлены изменения величины $y^+ = yu^+/\nu$ после диафрагмы для рассматриваемых моделей турбулентности с разными размерами пристеночной ячейки, где y — расстояние от стенки до центра граничной ячейки, $u^+ = \sqrt{\tau_w/\rho}$, где τ_w — напряжение трения на стенке, ν, ρ — соответственно кинематическая вязкость и плотность.

В моделях семейства κ - ε применение улучшенной процедуры расчета пристеночных функций (EWT) по сравнению со стандартной приводит к отличиям при определении протяженности зон рециркуляции: для модели realizable эти отличия существенны; для модели RNG они невелики. С увеличением числа Рейнольдса в моделях κ - ε уменьшаются различия в определении структуры возвратных токов между использованием SWF и EWT. Кроме этого, с увеличением Re по всем моделям турбулентности уменьшается расстояние от торца диафрагмы до точки присоединения углового вихря и, соответственно, увеличивается протяженность основного вихря.

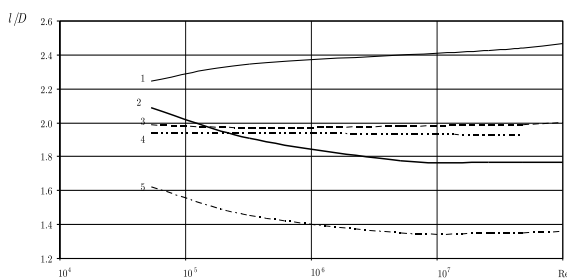


Рис. 2. Протяженности основного вихря для $\beta = 0,75$: 1 — S-A; 2 — realizable κ - ε (EWT); 3 — SST κ - ω ; 4 — RNG κ - ε (EWT); 5 — стандартная κ - ε (EWT)

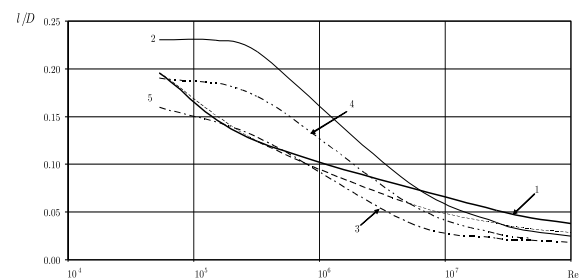


Рис. 3. Протяженности углового вихря для $\beta = 0,75$: 1 — S-A; 2 — realizable κ - ε (EWT); 3 — SST κ - ω ; 4 — RNG κ - ε (EWT); 5 — стандартная κ - ε (EWT)

При низких числах Рейнольдса положение точки присоединения основного вихря практически не зависит от качества сетки для всех моделей турбулентности. Для прогнозирования

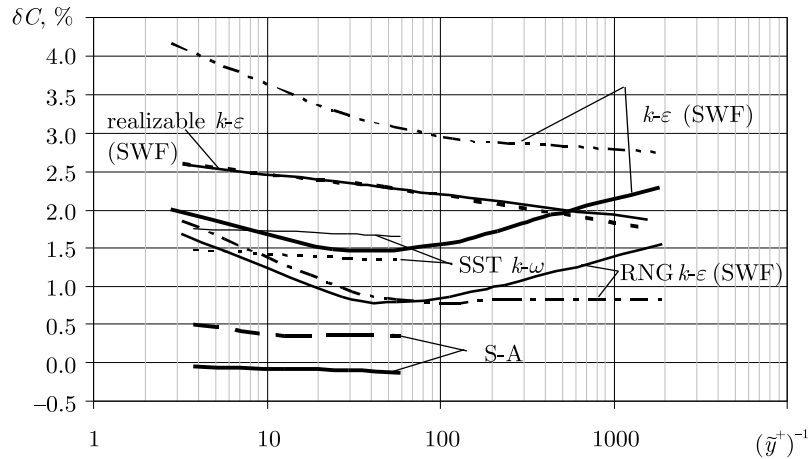


Рис. 4. Зависимости δC от осредненного значения на цилиндрическом участке диафрагмы для режима $Re = 5,3 \cdot 10^4$. Обозначения: сплошные линии — угловой способ отбора давления; пунктирные линии — трехрадиусный

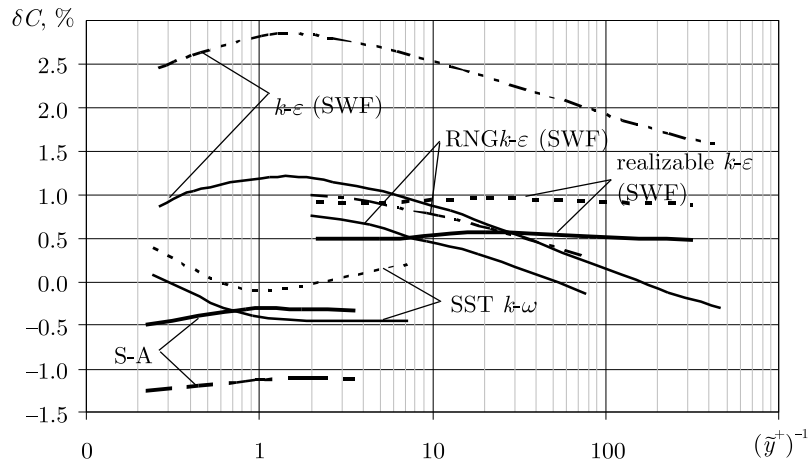


Рис. 5. Зависимости δC от осредненного значения на цилиндрическом участке диафрагмы для режима $Re = 5,1 \cdot 10^6$. Обозначения: сплошные линии — угловой способ отбора давления; пунктирные линии — трехрадиусный

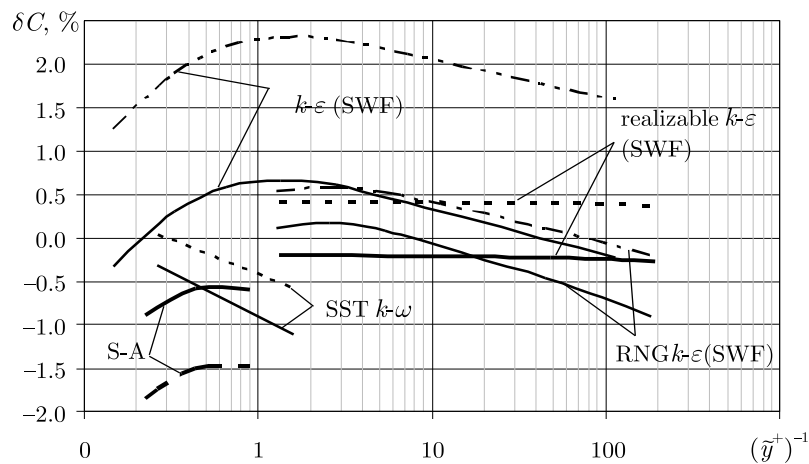


Рис. 6. Зависимости δC от осредненного значения на цилиндрическом участке диафрагмы для режима $Re = 2,6 \cdot 10^7$. Обозначения: сплошные линии — угловой способ отбора давления; пунктирные линии — трехрадиусный

ния местоположения точки присоединения углового вихря с помощью моделей турбулентности стандартная и RNG κ - ε с применением SWF получить сеточную независимость решения не удалось. При течении с высокими числами Рейнольдса существует аналогичная картина. Однако при определении положения точки присоединения углового вихря при больших Re сеточная независимость решения существует только для моделей семейства κ - ε с улучшенной процедурой расчета пристеночных функций.

Зависимости протяженности основного вихря от числа Рейнольдса для всех моделей различны (рис. 2). Положение точки присоединения основного вихря, рассчитанное по моделям SST κ - ω и RNG κ - ε (EWT) не зависит от числа Re . Размер углового вихря для всех моделей турбулентностей с ростом числа Рейнольдса уменьшается (рис. 3). Характер зависимостей протяженности вторичного углового вихря после диафрагмы от числа Рейнольдса аналогичен характеру зависимостей для углового вихря. Размеры вторичного углового вихря для рассмотренных моделей турбулентности изменяются от $l/D = 10^{-2}$ до $l/D = 2 \cdot 10^{-3}$ с увеличением Re .

Выявленная особенность, что положение точки присоединения основного вихря, рассчитанное по моделям SST κ - ω и RNG κ - ε (EWT), не зависит от Re , согласуется с тем, что положение минимального значения давления на стенке при $\beta = const$ не зависит от числа Рейнольдса [4]. Кроме того, при низких числах Рейнольдса местоположение точки присоединения углового вихря, рассчитанное по модели RNG κ - ε (EWT), практически так же не зависит от Re . Вышесказанное позволяет предположить, что модели SST κ - ω и RNG κ - ε (EWT) более адекватно описывают структуру потока в ИТ по сравнению с другими моделями турбулентности.

Другим критерием оценки применимости модели турбулентности является отклонение определенного из расчета коэффициента расхода от значения, определяемого ГОСТом [2], $\delta C = (C/C_{ГОСТ} - 1) \cdot 100\%$. Коэффициент расхода для несжимаемой жидкости представляет собой отношение действительного расхода к идеальному и определяется формулой

$$C = 4q_m \sqrt{1 - \beta^4} / (\pi d^2 \sqrt{2\rho\Delta p}), \quad (1)$$

где q_m — расход газа, определяемый по результатам измерений перепада давления на диафрагме Δp и плотности ρ . Для большей достоверности оценки сравнение проводилось для двух способов отбора давления — углового и трехрадиусного.

На рис. 4, 5, 6 обобщены зависимости отклонения δC для ИТ с $\beta = 0,75$ от обратной величины осредненного значения \tilde{y}^+ на цилиндрической поверхности отверстия диафрагмы в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Для моделей турбулентности семейства κ - ε представлены результаты с применением стандартной пристеночной функции.

При $Re = 5,3 \cdot 10^4$ (рис. 4) большинство моделей предсказывают коэффициенты расхода со значительным отклонением от стандарта и имеют разный характер изменения зависимостей $C = f(\tilde{y}^+)$ для углового и трехрадиусного способов отбора давления. Решения для моделей S-A и SST κ - ω имеют признаки сеточной независимости. Для модели S-A оба способа отбора давления обеспечивают получение коэффициента расхода с погрешностью, не превышающей методическую погрешность, определяемую стандартом. Оптимальной размер пристеночной ячейки, при котором значения коэффициентов расхода минимальны и имеют погрешность, удовлетворяющую требованиям ГОСТа, существует только для модели RNG κ - ε (SWF).

При $Re = 5,1 \cdot 10^6$ удовлетворительные результаты показала модель SST κ - ω (рис. 5). Близкие значения коэффициента расхода для углового и трехрадиусного способов отбора давления, соответствующие области допустимых значений, получены по модели RNG κ - ε . Однако сеточной независимости в решении для данной модели не достигнуто. Характерной особенностью расчета при высоких числах Re является сеточная независимость решения по моделям realizable κ - ε (SWF) и S-A для двух способов замера статического давления (рис. 5, 6). По модели S-A результат прогнозирования коэффициента расхода не является удовлетворительным.

При $Re = 2,6 \cdot 10^7$ расчетные значения коэффициента расхода по модели realizable κ - ε (SWF) лежат в области допустимых значений. При использовании сетки с параметром $\tilde{y}^+ < 1$

на цилиндрической поверхности диафрагмы для $Re > 2,6 \cdot 10^7$ модели SST $\kappa-\omega$ и S-A не дают устойчивого решения. В целом, модели SST $\kappa-\omega$ и S-A работают на относительно грубых сетках — предельное значение относительного поперечного размера пристеночной ячейки, при которой решение сходится, составляет $h_{y1}/D = 6 \cdot 10^{-6}$.

Значительное различие коэффициентов расхода для углового и трехрадиусного способов отбора давления между собой и их отклонения от значений стандарта, рассчитанных с помощью стандартной $\kappa-\varepsilon$ модели в широком диапазоне изменения Re , свидетельствует о том, что структура потока определяется неверно, и эту модель не следует использовать для расчета метрологических характеристик как со стандартной, так и с улучшенными процедурами расчета пристеночных функций.

Использование улучшенной процедуры расчета пристеночных функций в моделях realizable и RNG $\kappa-\varepsilon$ при высоких числах Рейнольдса обеспечивает сеточную независимость решения, а при средних и низких — оптимальную величину поперечного размера пристеночной ячейки, меньше которой отклонения от значений стандарта растут. Например, при $Re = 3,2 \cdot 10^5$ оптимальному размеру пристеночной ячейки на цилиндрическом участке диафрагмы соответствует величина $\tilde{y}^+ \approx 0,025$, а при $Re = 2,6 \cdot 10^7$ — $\tilde{y}^+ \approx 0,25$. Значения коэффициента расхода для углового способа отбора давления по моделям RNG и realizable $\kappa-\varepsilon$ с применением EWT при $Re > 7 \cdot 10^6$ выходят за пределы области допустимых значений.

Вывод по применимости моделей турбулентности для расчета коэффициента расхода в ИТ с $\beta = 0,75$ следует из рис. 7, на котором представлены зависимости $\delta C = f(Re)$ в области допустимых значений по величине отклонения δC .

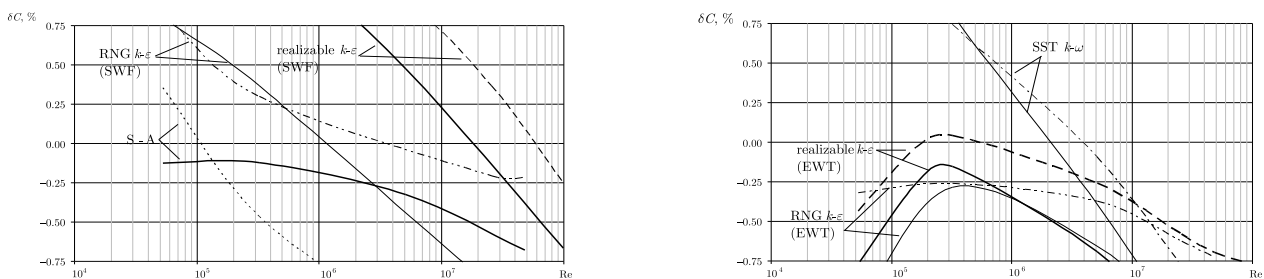


Рис. 7. Зависимости от числа Рейнольдса отклонений расчетного значения коэффициента расхода от данных стандарта [2]: сплошные линии — угловой способ отбора давления; пунктирные линии — трехрадиусный способ отбора давления

Существенно различный характер зависимостей $\delta C = f(Re)$ для углового и трехрадиусного способов отбора давления при использовании модели S-A не позволяет утверждать о ее корректном применении для описания структуры потока в ИТ и расчета метрологических характеристик. Среди всех моделей наиболее близкие между собой значения коэффициента расхода по двум способам отбора давления во всем диапазоне чисел Рейнольдса обеспечивает модель турбулентности SST $\kappa-\omega$. Расхождение зависимостей $\delta C = f(Re)$ для углового и трехрадиусного способов отбора давления по модели RNG $\kappa-\varepsilon$ (SWF) свидетельствует о необходимости ограничения диапазона ее применения областью $Re \leq 5 \cdot 10^6$. Решение по модели realizable $\kappa-\varepsilon$ (SWF) при $Re > 9 \cdot 10^6$ единственное среди рассмотренных, при котором с увеличением Re не наблюдается роста расхождений в значениях коэффициента расхода, определенного разными способами отбора давления. Применение EWT в моделях RNG и realizable $\kappa-\varepsilon$ обеспечивает приблизительно одинаковый диапазон чисел Рейнольдса для допустимых значений коэффициента расхода.

Проведенные исследования позволили сформулировать требования к построению сеток в пристеночных слоях. Для моделей SST $\kappa-\omega$, realizable $\kappa-\varepsilon$ (SWF), RNG $\kappa-\varepsilon$ (EWT) и realizable $\kappa-\varepsilon$ (EWT) осредненные значения \tilde{y}^+ на цилиндрическом участке диафрагмы в представленных диапазонах применимости этих моделей (рис. 7) соответственно составляют $\tilde{y}^+ \approx 1$, $\tilde{y}^+ \approx 0,1$ и $\tilde{y}^+ \approx 0,01 \div 0,1$ для моделей с применением улучшенной процеду-

ры расчета пристеночных функций. Для модели RNG κ - ε (SWF) $\tilde{y}^+ \approx 0,01$ в диапазоне $7 \cdot 10^4 \leq Re \leq 10^6$.

Диапазон чисел Рейнольдса, соответствующий области допустимых расчетных значений δC по моделям SST κ - ε и RNG κ - ε (SWF) для $\beta = 0,75$, хорошо согласуется с диапазоном применимости этих моделей при определении коэффициента расхода по угловому способу отбора давления для $\beta = 0,567$.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Все RANS модели турбулентности по-разному определяют структуру потока в зоне рециркуляции за диафрагмой. Выявлено наличие вторичного углового вихря за диафрагмой и установлены зависимости протяженности рециркуляционных зон от числа Рейнольдса. Анализ влияния параметров сетки на точность расчета позволил сформировать рекомендации по выбору размеров пристеночных слоев, выявить RANS модели турбулентности и диапазоны чисел Рейнольдса, в которых данные модели турбулентности позволяют рассчитывать коэффициент расхода стандартной диафрагмой с погрешностью, удовлетворяющей требованиям стандарта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахлямов М. Н. Математическое моделирование течения многокомпонентной газовой смеси в трехмерной постановке задачи. Определение дополнительной погрешности коэффициента истечения от сокращения длин прямых участков: Дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: 05.13.18 / КГТУ. — Казань, 2005. — 138 с.
2. ГОСТ 8.586.2Ц2005 (ИСО 5167Ц2:2003). Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 2. Диафрагмы. Технические требования. — М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2007. — 38 с.
3. Ганиев Р. И., Николаев Н. А., Сабирзянов А. Н. и др. Выбор сетки и модели турбулентности для расчета коэффициента расхода стандартной диафрагмы // Изв. Вузов. «Авиационная техника», 2008. — № 4. — С. 21–24.
4. Фафурин В. А. Гидродинамика и разделительная способность течений в гидромеханических устройствах и аппаратах: Дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук: 05.17.08 / КГТУ. — Казань, 2002. — 256 с.

Поступила в редакцию 12.04.10

R. A. Tyryshkin, A. N. Sabirzyanov, V. A. Fafurin, V. V. Fefelov, V. B. Javkin
Flow simulation in a flowmeter with a standard orifice plate

Research results of turbulence models RANS application possibility for a stream structure in a measuring pipeline with the standard orifice plates description and flow coefficient calculation with the accuracy regulated by the standard are presented. The influence of the grid parameters on the calculation accuracy is shown and grid concentration in the near-wall regions recommendations are generated. Detachable zones length on the Reynolds number dependences are presented. Reynolds number ranges of various turbulence models RANS applicability are installed for flow coefficient definition with the accuracy meeting the standards requirements.

Keywords: turbulence model, discharge coefficient, orifice plate, CFD, stream structure.

Mathematical Subject Classifications: 76F55

Тырышкин Роман Александрович, начальник отдела разработки программного обеспечения, РФ, 420107, г. Казань, ул. Петербургская, 50, офис 526, 527, ООО «СТП», 420107, РФ, г. Казань, ул. Петербургская, 50 (офис 526), e-mail: office@ooostp.ru

Сабирзянов Андрей Наилевич, к. т. н., доцент, кафедра специальных двигателей, КГТУ им. А. Н. Туполева, 420111, РФ, Казань, ул. К. Маркса, 10, e-mail: sabirzan@kstu-kai.ru

Фелелов Владимир Викторович, аспирант кафедры САиУТП КГТУ, 420015, РФ, Казань, ул. К. Маркса, 72, корп. «О», e-mail: fefelov85@mail.ru

Фафурин Виктор Андреевич, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой, кафедра САиУТП, КГТУ, 420015, РФ, Казань, ул. К. Маркса, 72, корп. «О», e-mail: sautp@kstu.ru

Явкин Владимир Борисович, к. т. н., доцент, кафедра АДиЭу, КГТУ им. А. Н. Туполева, 420111, РФ, Казань, ул. К. Маркса, 10, e-mail: yavkin@mi.ru