

УДК 532.526.5:519.63

Эффективность использования квадратичных моделей турбулентности для моделирования отрывных течений в технологических установках

Д-р техн. наук И. Х. ИСРАФИЛОВ¹, С. В. БОЛДЫРЕВ,

канд. техн. наук А. В. БОЛДЫРЕВ²

¹irmaris@yandex.ru, ²alexeyboldyrev@mail.ru

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Набережночелнинский институт

423810, Республика Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира, д. 68/19 (1/18)

Канд. физ.-мат. наук С. И. ХАРЧУК

kharchyk@mail.ru

Казанский государственный энергетический университет

420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51

В работе проведено численное моделирование квазистационарного отрывного турбулентного течения несжимаемого газа в канале за обратным уступом в двухмерной постановке. Применены высокорейнольдсовая и низкорейнольдсовая квадратичные $k-\varepsilon$ модели турбулентности. Достигнуто хорошее качественное соответствие результатов моделирования экспериментальным данным. Для обоих вариантов расчетов получены почти идентичные профили скорости и кинетической турбулентной энергии в поперечных сечениях канала, распределение давления вдоль верхней и нижней стенок и длина рециркуляционной зоны. Однако замечено значительное завышение коэффициента поверхностного трения при использовании низкорейнольдсовой модели. Кроме того, в этом случае требуется значительно больше вычислительных ресурсов и времени для решения задачи. Таким образом, высокорейнольдсовую квадратичную $k-\varepsilon$ модель турбулентности можно рекомендовать при расчетах отрывных течений в технологических установках.

Ключевые слова: численное моделирование, обратный уступ, турбулентное течение, отрывное течение, модель турбулентности.

Efficiency of quadratic turbulence models application for separated flows simulation in technological aggregates

D. Sc. I. K. ISRAPHILOV¹, S. V. BOLDYREV, *Ph. D.* A. V. BOLDYREV²

¹irmaris@yandex.ru, ²alexeyboldyrev@mail.ru

Naberezhnye Chelny institute (branch) of Kazan Federal University

423810, Republic of Tatarstan, Naberezhnye Chelny, Mira avenue, 68/19 (1/18)

Ph. D. S. I. KHARCHUK

kharchyk@mail.ru

Kazan State Power Engineering University

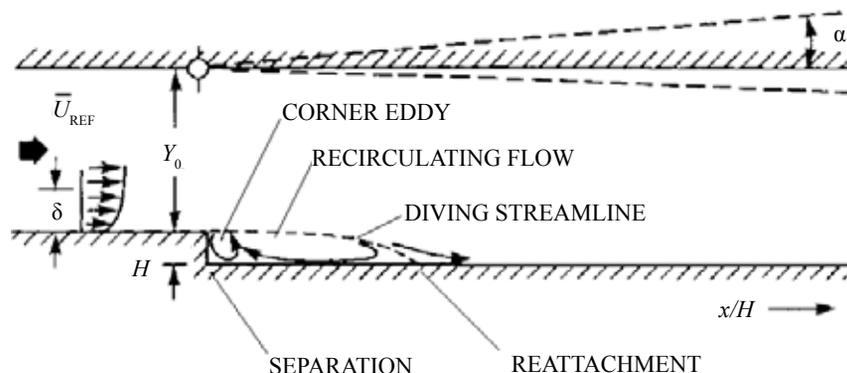
420066, Republic of Tatarstan, Kazan, Krasnoselskaya str., 51

The numerical simulation of quasi-steady two-dimensional separated turbulent flow of incompressible gas in channel behind rearward-facing step in two-dimensional array is carried out. High-Reynolds number and Low-Reynolds number quadratic $k-\varepsilon$ turbulence models are applied. Simulation results and experimental data fit properly. For both variants of calculation almost identical velocity and kinetic turbulent energy profiles in cross-sections of channel, pressure distribution along upper and lower walls, length of recirculation zone have been attained. However, for Low-Reynolds number model significant overestimation of skin-friction coefficient is observed, time and computational resource requirements being also increased. Thus for separated flows calculations in technological unite High-Reynolds number quadratic $k-\varepsilon$ turbulence model is to be recommended.

Keywords: numerical simulation, rearward-facing step, turbulent flow, separated flow, turbulence model.

В технологии производства продуктов питания применяется большое количество разнообразных аппаратов (фильтры, смесители, сепараторы, сушильные камеры, выпарные установки, теплообменники и т.д.), основным условием действия которых является прокачка од-

нофазных или многофазных сред [1, 2]. Эффективность их работы во многом определяется структурой основного потока, на характер течения которого накладываются возмущающие факторы, такие как локальные зоны пониженных и повышенных давлений и /или температур, на-



TUNNEL GEOMETRY: $H = 1,27 \text{ cm}$, $Y_0 = 8 H$
 TUNNEL SPAN: $12 H$
 TOP-WALL ANGLES: $-2^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$

INLET CONDITIONS: $U_{\text{REF}} = 44,2 \text{ m/sec}$, $M_{\text{REF}} = 0,128$
 $\delta_{\text{BL}} = 1,9 \text{ sm}$, $\text{Re}_\theta = 5000$

Рис. 1. Схема установки в экспериментах Драйвера и Сигмиллера [6]

личие твердых частиц [3] или кавитации [4], резкая смена конфигурации потока (коллектора, диафрагмы, системы дозирования [5] и т. д.), присутствие кривизны, вращения и периодических воздействий. Такие возмущения распространяются в потоке, благодаря «эффекту памяти».

Изучение совместного влияния нескольких факторов представляет собой трудную теоретическую и практическую задачу.

Поэтому в настоящей работе путем численного моделирования исследуется один из наиболее общих результатов подобных воздействий, когда в потоке формируются зоны с отрывными течениями, в которых наблюдаются реверс потока, локальные области повышенного и пониженного давления, переменный градиент давления и температуры. Эти параметры существенным образом влияют на основные характеристики аппаратов: массообмен, теплообмен, расходно-перепадные зависимости, эффективность смешения и энергозатраты.

Несмотря на относительную простоту конструкции, в которой формируется отрывная зона, предсказать поведение потока на разных режимах при различных соотношениях параметров представляется проблематичным.

Так в работе [6] Драйвером и Сигмиллером экспериментально исследовано отрывное турбулентное течение в канале за обратным уступом высотой $H = 12,7 \text{ мм}$ при различных углах отклонения α верхней стенки от направления движения основного потока (рис. 1). Отношение высоты подводящего трубопровода к высоте канала, равное $8/9$, выбрано для минимизации влияния продольного положительного градиента давления. При помощи лазерно-доплеровских анемометра и интерферометра и трубки Пито, авторами измерены проекции скорости и пульсационные параметры течения в нескольких поперечных сечениях канала, а также распределение касательного напряжения и давления на верхней и нижней стенках канала.

В публикации [7] приведены результаты измерений мгновенного вектора поверхностного трения, полученные для отрывного турбулентного течения в канале прямоугольного поперечного сечения за выступом в виде

тонкой пластины высотой 20 мм . Определена протяженность рециркуляционной зоны.

В работе [8] проанализированы возможности применения двухпараметрических моделей турбулентности для расчета характеристик отрывных потоков на примере течения за обратным уступом. Показано, что главными причинами ошибок, возникающих при использовании $k-\epsilon$ моделей турбулентности, являются недостаточная разрешающая способность расчетной сетки и использование гипотезы Буссинеска. Исходя из полученных результатов моделирования, для расчетов течения за обратным уступом авторами рекомендована стандартная $k-\epsilon$ модель турбулентности, модифицированная для учета анизотропии течения.

Авторами публикации [9] изучено влияние на параметры течения периодического вдува/отсоса через тонкую щель в стенке обратного уступа высотой H . Для расчета нестационарного отрывного турбулентного течения выбраны: моделирование больших вихрей (LES), моделирование отсоединенных вихрей (DES) и несколько моделей турбулентности совместно с осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса (T-RANS). Экспериментально обнаруженное критическое значение числа Струхала $\text{Sh} = (f_e \cdot H)/U = 0,19$ (f_e — частота), при котором происходит укорачивание рециркуляционной зоны на $28,3\%$, предсказано во всех вариантах расчетов. Однако в ходе сравнения длин отрывной области моделями типа T-RANS показана более слабая чувствительность к наложенным колебаниям.

В ходе экспериментального исследования структуры данного течения [10] замечено расширение оторвавшегося сдвигового слоя и возникновение большого «скатывающегося» вихря на линии, отделяющей основной поток от рециркуляционной зоны. По мнению авторов, именно срыв больших вихрей, является причиной сокращения длины отрывной области по сравнению со случаем квазистационарного отрывного течения.

Попытки связать указанное организованное движение вихрей со статистическими турбулентными характеристиками предпринято в работе [11]. Поле скорости

изучено с помощью PIV-метода. Замечено, что при эффективной частоте наложенных колебаний в результате сильного растяжения последовательно движущихся оторвавшихся вихрей появляются области с повышенным уровнем напряжений Рейнольдса.

В технологических аппаратах, как правило, отрывные течения являются существенно трехмерными и турбулентными. Поэтому для получения адекватного результата численного эксперимента необходимо тщательным образом разработать математическую модель турбулентного отрывного течения, которая может быть верифицирована только на базе достоверных экспериментальных данных.

Цель настоящей работы — оценка эффективности использования высокорейнольдсовых и низкорейнольдсовых квадратичных k - ε моделей турбулентности для моделирования квазистационарных отрывных турбулентных течений в трубопроводах, каналах и технологических установках. В качестве объекта исследования выбрано рассмотренное выше течение за обратным уступом [6].

Составлена математическая модель квазистационарного отрывного турбулентного течения вязкого несжимаемого газа. Плотность воздуха ρ считалась постоянной, поскольку значение числа Маха в экспериментах [6] не превысило 0,128. Поля скоростей V и давлений P вычислены из, осредненных по Рейнольдсу, уравнений Навье-Стокса и неразрывности (RANS [12]).

Для замыкания системы уравнений необходимо определить компоненты тензора турбулентных напряжений τ_{turb} . В настоящих расчетах использованы два варианта квадратичной стандартной k - ε модели турбулентности [13]: высокорейнольдсовая с пристеночными функциями («high-Re QKE») и низкорейнольдсовая с демпфирующими функциями, позволяющими рассчитать течение в ламинарном подслое («low-Re QKE»).

Квадратичная модель турбулентности подразумевает, что вместо гипотезы Буссинеска [12] применяется нелинейные зависимости [13] тензора турбулентных напряжений и коэффициента турбулентной вязкости C_μ от тензоров относительных скоростей деформаций $S_{ij}^* = 0,5 \cdot [(\partial V_i / \partial x_j) + (\partial V_j / \partial x_i)]$ и завихренности $\Omega_{ij} = 0,5 \cdot [(\partial V_i / \partial x_j) - (\partial V_j / \partial x_i)]$ осредненного движения газа (подразумевается суммирование по повторяющемуся индексу):

$$\tau_{turb_{ij}} = \left(2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \right) - 4C_1 \rho \frac{k^3}{\varepsilon^2} \left(S_{in} S_{nj} - \frac{\delta_{ij} S_{mn} S_{mn}}{3} \right) - 4C_2 \rho \frac{k^3}{\varepsilon^2} \left(\Omega_{in} S_{nj} + \Omega_{jn} S_{ni} \right) - 4C_3 \rho \frac{k^3}{\varepsilon^2} \left(\Omega_{in} \Omega_{nj} - \frac{\delta_{ij} \Omega_{mn} \Omega_{mn}}{3} \right), \quad (1)$$

$$C_\mu = \frac{C_{A0}}{C_{A1} + C_{A2} \cdot S^* + C_{A3} \cdot \Omega^*}, \quad (2)$$

где $S^* = (k/\varepsilon) \cdot \sqrt{2 \cdot S_{ij} \cdot S_{ij}}$ и $\Omega^* = (k/\varepsilon) \cdot \sqrt{2 \cdot \Omega_{ij} \cdot \Omega_{ij}}$ — скалярные величины, связанные со вторыми инвариантами тензоров S_{ij} и Ω_{ij} ; k — кинетическая турбулентная энергия; ε — скорость ее диссипации; μ_t — турбулентная вязкость; δ_{ij} — единичный тензор; $C_1, C_2, C_3, C_{A0}, C_{A1}, C_{A3}$ — коэффициенты модели.

Нелинейная модель позволяет описать эффекты турбулентной памяти и точнее прогнозировать значения нормальных турбулентных напряжений применительно к турбулентным потокам в каналах (учет анизотропии течения).

Численное моделирование исследуемого течения проведено в двухмерной постановке в лицензионном программном пакете STAR-CCM+ 8.02.011.

Форма и размеры расчетной области (рис. 2) определены в соответствии с параметрами экспериментальной установки при угле наклона $\alpha = 0^\circ$ [6].

На входной границе (рис. 2), удаленной от обратного уступа более чем на $90H$, заданы равномерные по высоте подводящего трубопровода профили продольной компоненты скорости $U_{cp1} = 44,2$ м/с и кинетической турбулентной энергии $k_1 \approx 1,7$ Дж/кг. На выходной границе, расположенной за обратным уступом на расстоянии 1 м, определено нулевое избыточное статическое давление, а параметры турбулентности вычислены посредством экстраполяции. На стенках установлены нулевые значения продольной и поперечной компонент скорости (условия «непроницаемости» и «непроскальзывания»). В экспериментах [6] на входном участке стенки подводящего трубопровода в качестве турбулизатора пограничного слоя применялась наждачная бумага, поэтому в расчетах, использующих высокорейнольдсовый вариант k - ε модели турбулентности, на этом участке задана эквивалентная шероховатость стенки.

Для дискретизации расчетной области построены сетки из квадратных ячеек размером от 0,6 до 1,2 мм.

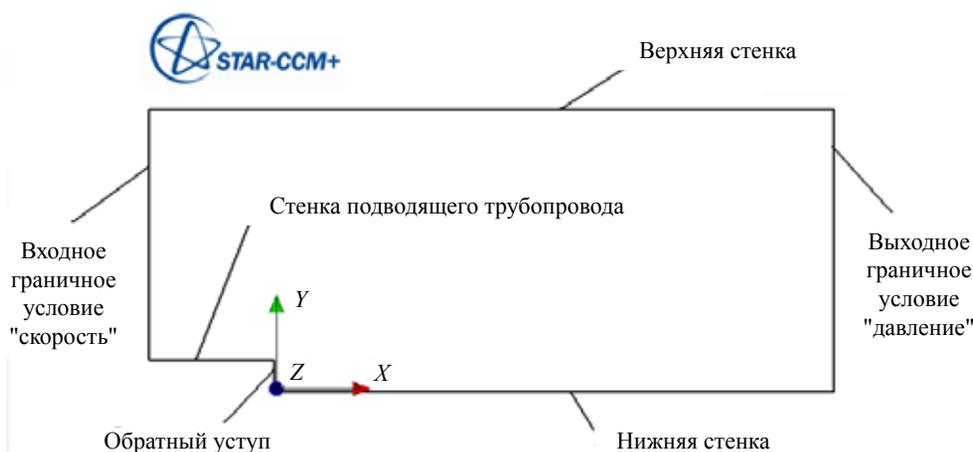


Рис. 2. Схема расчетной области. Граничные условия

В рециркуляционной зоне за обратным уступом по всей его высоте на расстоянии $20H$ размер ячеек уменьшался до $0,3\text{ мм}$. Нормальный по отношению к стенкам размер пристеночных ячеек выбран в одном случае согласно условию использования пристеночных функций $y^+ = 30-60$, а в другом — для корректного расчета течения в ламинарном подслое $y^+ < 1$. Таким образом, количество ячеек для варианта с высокорейнольдсовой моделью турбулентности составило около 117000, а для варианта с низкорейнольдсовой — около 138000.

Итерационный процесс в каждом случае продолжался до снижения уровня среднеквадратичных невязок по всем дифференциальным уравнениям не выше 10^{-4} и до стабилизации средних давлений и скоростей на входной и выходной границах расчетной области.

Результаты моделирования с применением высокорейнольдсовой и низкорейнольдсовой моделей турбулентности сравнены между собой и с данными натурных экспериментов [6]. Основное внимание уделено сопоставлению безразмерных профилей продольной компоненты скорости движения воздуха и кинетической турбулентной энергии потока в 22-х поперечных сечениях канала (частично на рис. 3, 4), а также распределению коэффициентов поверхностного трения C_F и давления C_p вдоль нижней и верхней стенок канала (частично на рис. 5, 6, см. стр. 73).

Замечена почти полная идентичность расчетных профилей скорости при использовании моделей «high-Re QKE» и «low-Re QKE», некоторая разница между ними есть лишь в ламинарном подслое (рис. 3). Получе-

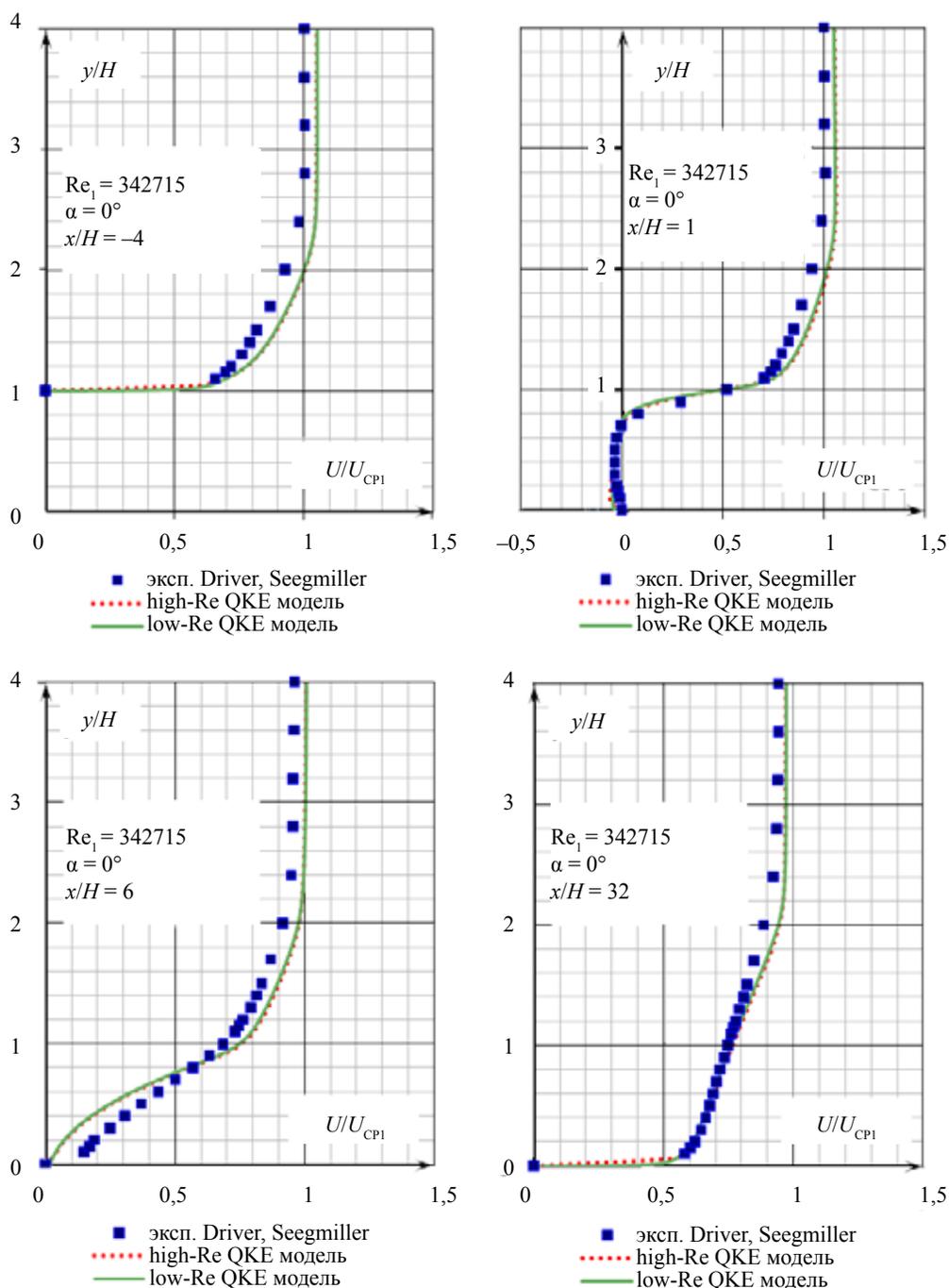


Рис. 3. Профили безразмерной продольной компоненты скорости движения воздуха в нескольких поперечных сечениях канала

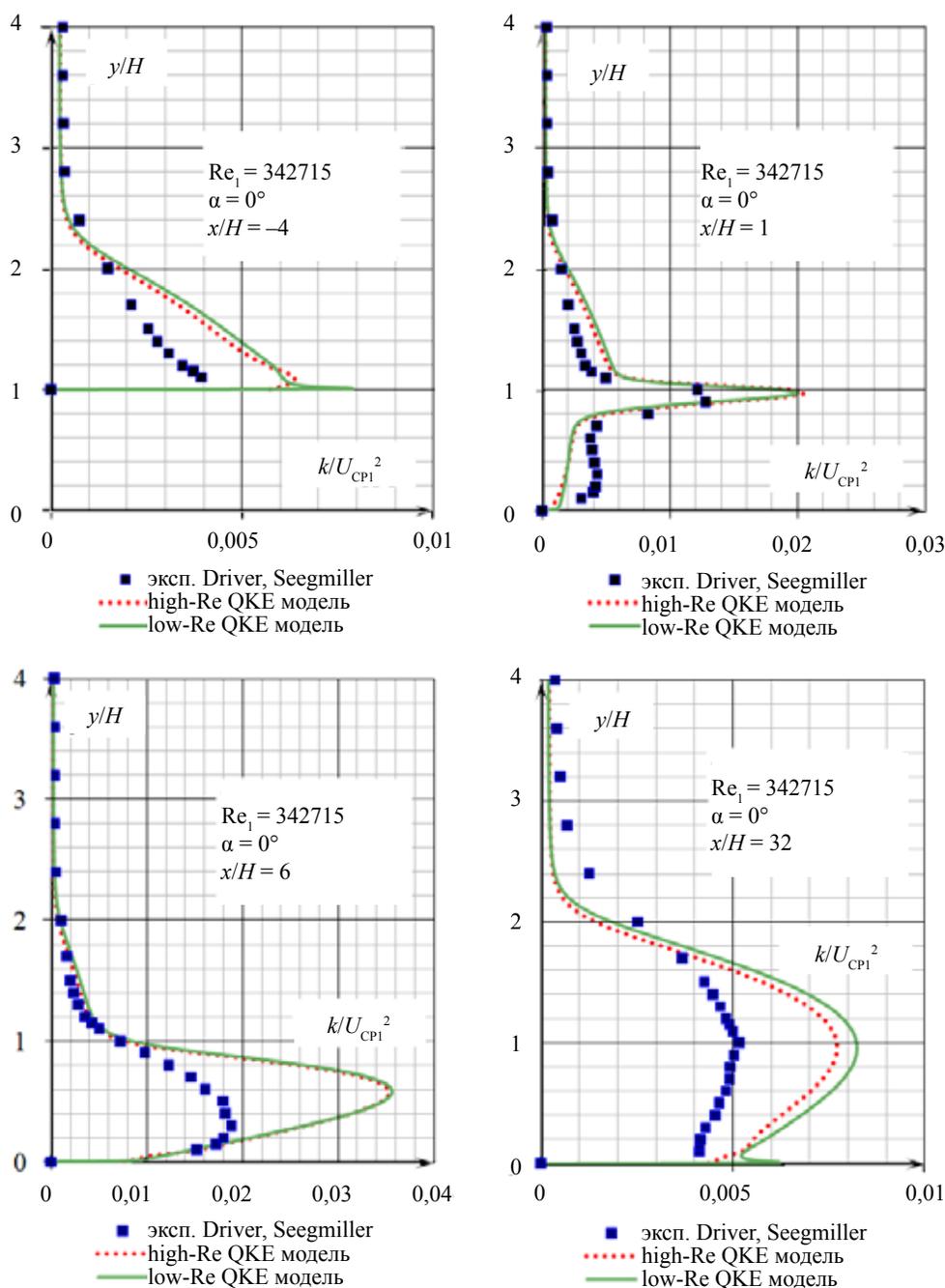


Рис. 4. Профили безразмерной кинетической турбулентной энергии потока в нескольких поперечных сечениях канала

но хорошее качественное соответствие экспериментальным данным. В то же время выявлено завышение значений скорости в ядре потока и занижение — в пограничном слое, особенно заметное отклонение соответствует сечениям, расположенным вблизи точки присоединения оторвавшегося потока.

Обнаружено, что выбор между моделями «high-Re QKE» и «low-Re QKE» оказывает более значительное влияние на турбулентные характеристики течения, в частности, на профили кинетической турбулентной энергии внутри пограничного слоя (рис. 4). В целом, использование высокорейнольдсовой модели обеспечивает несколько лучший прогноз по энергии k .

Как и в экспериментах [6], положение экстремума энергии пульсаций соответствует оторвавшемуся сдвиговому слою, который ниже по течению от обрат-

ного уступа приближается к стенке. Следует отметить, что в расчетах данное смещение координаты экстремума получается сильно заниженным. В зоне релаксации, где начинает образовываться новый пограничный слой, пульсации скорости уменьшаются, но в пределах рассматриваемой расчетной области не успевают достигнуть значений, соответствующих первоначальному течению в подводящем трубопроводе.

Тем не менее, погрешность расчета по обеим моделям достаточно велика. Во всех рассмотренных поперечных сечениях, даже в подводящем трубопроводе ($x/H = -4$), расчетная максимальная величина энергии пульсаций в пограничном слое превышает экспериментальную, примерно в 1,5–1,8 раза. Несколько выше точность расчета профилей энергии k в рециркуляционной зоне, например, в сечении $x/H = 1$.

По нулевому значению коэффициента поверхностного трения C_f на нижней стенке канала (рис. 5) определена координата точки присоединения оторвавшегося потока. В ходе расчетов с использованием обеих моделей турбулентности предсказана примерно одинаковая протяженность рециркуляционной зоны, заниженная по сравнению с экспериментальным значением на 6,7%.

Интересно, что значения коэффициента поверхностного трения, предсказанные моделями «high-Re QKE» и «low-Re QKE» отличаются в 2 и более раза. Причем максимальное отклонение от экспериментальных данных при использовании высокорейнольдсовой модели турбулентности составило 15% в рециркуляционной зоне и 26% в начале зоны релаксации.

Следует отметить, что в аналогичном методологическом исследовании [14] применение низкорейнольдсовой модели турбулентности при общем количестве ячеек сетки 351000 привело к завышению коэффициента поверхностного трения в отрывной зоне по сравнению с данными [6] в 2,2 раза. В то же время в работах [15, 16] лишь применение модифицированной $k-\omega$ SST модели турбулентности обеспечило приемлемую точность расчетов касательных напряжений на стенках канала.

Из анализа распределений коэффициента давления вдоль нижней (рис. 6) и верхней стенок канала видно, что погрешность расчета поля давления минимальна внутри рециркуляционной зоны и возрастает до 33% в зоне релаксации после присоединения оторвавшегося потока. Причем, результаты, полученные моделью «low-Re QKE», несколько ближе к экспериментальным данным, хотя, в целом, отклонение значений коэффициента давления, полученных для обоих вариантов незначительно.

Таким образом, квадратичные $k-\epsilon$ модели турбулентности позволяют предсказать интегральные характеристики отрывного течения, а значит, процессы переноса массы, количества движения и энергии. Поэтому можно рекомендовать их применение для численного исследования отрывных течений газов, возникающих в трактах технологических установок.

Однако при использовании данных моделей недостатком является погрешность расчета турбулентных характеристик течения. Поэтому необходимо продолжить исследование на других режимах течения, а также при ненулевых углах отклонения верхней стенки для ясного понимания причин отклонений от экспериментальных данных.

Одним из решений проблемы является модификация модели турбулентности для более детального учета процессов растяжения и срыва вихрей. Причем, высокорейнольдсовая модель представляется перспективнее ввиду лучшей предсказательности, меньших затрат вычислительных и временных ресурсов на решение задачи, а также возможности учесть шероховатость стенок и другие особенности пристенных течений.

Список литературы

1. Бараненко А. В., Ховалыг Д. Методы расчета градиента давления двухфазного потока при течении в малых каналах // Вестник Международной академии холода. 2012. №1. С. 3–10.
2. Пеленко В. В. и др. Особенности течения тонких пленок жидкости в условиях проскальзывания на обтекаемой поверхности // Процессы и аппараты пищевых производств. 2012. №2.

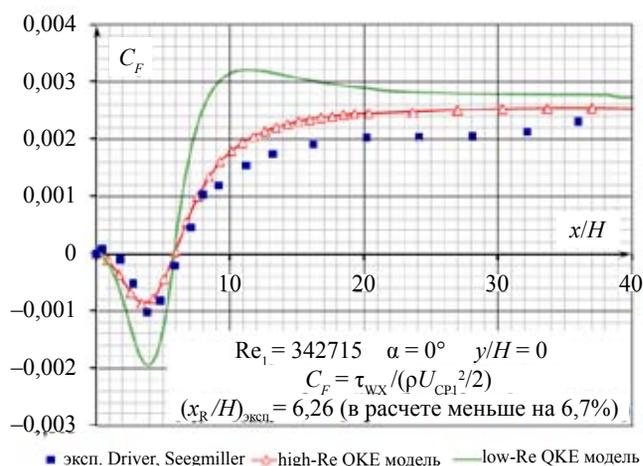


Рис. 5. Распределение коэффициента поверхностного трения вдоль нижней стенки канала

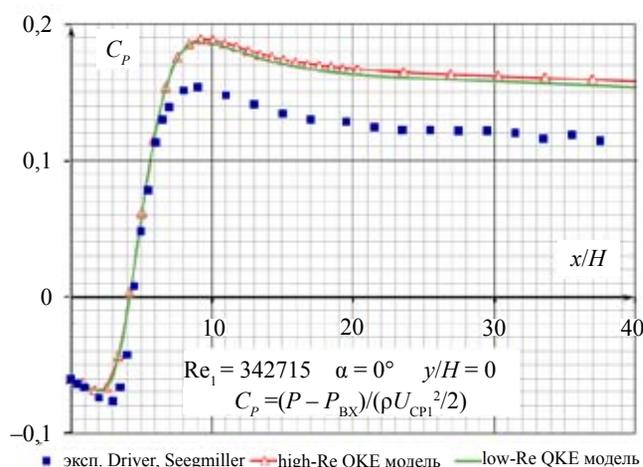


Рис. 6. Распределение коэффициента давления вдоль нижней стенки канала

3. Пеленко В. В., Вороненко С. В., Поляков Б. А. К вопросу об описании гидромеханического процесса осаждения твердых частиц в жидкой среде // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. №2.
4. Алексеев Г. В., Гришанова (Даниленко) Е. А., Кондратов А. В., Гончаров М. В. Возможности реализации эффектов кавитации для измельчения пищевого сырья // Вестник Международной академии холода. 2012. №3. С. 45–47.
5. Алексеев Г. В., Лунев К. Н. Течение жидкости в каналах дозатора в процессе вытеснения и исследование точности наполнения тары // Известия СПбГУНИПТ. 2009. №2. С. 51–54.
6. Алексеев Г. В. и др. Математические методы в пищевой инженерии: Учебное пособие. — СПб.: Лань, 2012. 176 с.
7. Driver D. M., Seegmiller H. L. Features of a reattaching turbulent shear layer in divergent channel flow // AIAA Journal. 1985. Vol. 23. No. 2. P. 163–171.
8. Козлов А. П. Характеристики вектора поверхностного трения в турбулентных отрывных и присоединяющихся течениях/А. П. Козлов, Н. И. Михеев, В. М. Молочников, А. К. Сайкин // Известия РАН. Энергетика. 1998. №4. С. 3–31.
9. Thangam, S. Turbulent flow past a backward-facing step: a critical evaluation of two-equation models/S. Thangam, C. G. Speziale // AIAA Journal. 1992. Vol. 30. No. 5. P. 1314–1320.
10. Šarić, S. A periodically perturbed backward-facing step flow by means of LES, DES and T-RANS: An example of flow separation

control/S. Šarić, S. Jakirlić, C. Tropea // *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*. 2005. Vol. 127. No. 5. P. 879–887.

11. Chun, K. B. Control of turbulent separated flow over a backward-facing step by local forcing/K. B. Chun, H. J. Sung // *Experiments in Fluids*. 1996. Vol. 21. No. 6. P. 417–426.

12. Yoshioka, S. Organized vortex motion in periodically perturbed turbulent separated flow over a backward-facing step/S. Yoshioka, S. Obi, S. Masuda // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2001. Vol. 22. No. 3. P. 301–307.

13. Белов И. А., Исаев С. А. — Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие. — СПб. 2001. 108 с.

14. Lien F. S., Chen W. L., Leschziner M. A. Low-Reynolds number eddy-viscosity modeling based on non-linear stress-strain/vorticity relations, Proc. 3rd Symp. On Engineering Turbulence Modelling and Measurements, 27–29 May 1996, Crete, Greece.

15. Молочников В. М. Исследование применимости пакета Fluent к моделированию дозвуковых отрывных течений/В. М. Молочников, Н. И. Михеев, О. А. Душина // *Теплофизика и аэромеханика*. 2009. Т. 16. № 3. С. 387–394.

16. Yoder D. A., Georgiadis N. J. Implementation and validation of the Chien k-epsilon turbulence model in the WIND Navier-Stokes Code // *AIAA Paper 99-0745*. Jan. 1999.

References

1. Khovalyg D., Baranenko A. V. Methods for calculating the pressure gradient of a two-phase flow through small-diameter conduits. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda*. 2012. No 1. p. 3–10. (in Russian)

2. Pelenko V. V. et al. Features of a current of thin films of liquid in the conditions of slip on a streamline surface. *Protessy i apparaty pishchevykh proizvodstv*. 2012. No 2. (in Russian)

3. Pelenko V. V., Voronenko S. V., Polyakov B. A. To a question of the description of hydromechanical process of sedimentation of solid particles in the liquid environment. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. 2013. No 2. (in Russian)

4. Alexeev G. V., Grischanova (Danilenko) E. A., Kondratov A. V., Goncharov M. V. Possibilities of implementing the effects of cavitation for shredding food raw materials. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda*. 2012. No 3. p. 45–47. (in Russian)

5. Alekseev G. V., Lunev K. N. Current of liquid in channels of the dispenser in the course of extrusion and research of accuracy of filling of tare. *Izvestiya SPbGUNIPT*. 2009. No 2. p. 51–54. (in Russian)

6. Alekseev G. V. et al. Mathematical methods in food engineering. Manual. — St. Petersburg. 2012. 176 p. (in Russian)

7. Driver D. M., Seegmiller H. L. Features of a reattaching turbulent shear layer in divergent channel flow. *AIAA Journal*. 1985. Vol. 23. No. 2. P. 163–171.

8. Kozlov A. P. Characteristics of a vector of surface friction in the sinuous tear-off and joining flows/A. P. Kozlov, N. I. Mikheev, V. M. Molochnikov, A. K. Saykin. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika*. 1998. № 4. p. 3–31. (in Russian)

9. Thangam, S. Turbulent flow past a backward-facing step: a critical evaluation of two-equation models/S. Thangam, C. G. Speziale. *AIAA Journal*. 1992. Vol. 30. No. 5. P. 1314–1320.

10. Šarić, S. A periodically perturbed backward-facing step flow by means of LES, DES and T-RANS: An example of flow separation control/S. Šarić, S. Jakirlić, C. Tropea. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*. 2005. Vol. 127. No. 5. P. 879–887.

11. Chun, K. B. Control of turbulent separated flow over a backward-facing step by local forcing/K. B. Chun, H. J. Sung. *Experiments in Fluids*. 1996. Vol. 21. No. 6. P. 417–426.

12. Yoshioka, S. Organized vortex motion in periodically perturbed turbulent separated flow over a backward-facing step/S. Yoshioka, S. Obi, S. Masuda. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2001. Vol. 22. No. 3. P. 301–307.

13. Belov I. A., Isaev S. A. Simulation of sinuous flows: Manual. — St. Petersburg. 2001. 108 p. (in Russian)

14. Lien F. S., Chen W. L., Leschziner M. A. Low-Reynolds number eddy-viscosity modeling based on non-linear stress-strain/vorticity relations, Proc. 3rd Symp. On Engineering Turbulence Modelling and Measurements, 27–29 May 1996, Crete, Greece.

15. Molochnikov V. M., Mikheev N. I., Dushina O. A. Research of applicability of a packet of Fluent to simulation of subsonic tear-off currents *Teplofizika i aeromekhanika*. 2009. Т. 16. No 3. p. 387–394. (in Russian)

16. Yoder D. A., Georgiadis N. J. Implementation and validation of the Chien k-epsilon turbulence model in the WIND Navier-Stokes Code. *AIAA Paper 99-0745*. Jan. 1999.

Авторам и читателям журнала!



С 2014 г. действует официальный сайт журнала «Вестник Международной академии холода»
www.vestnikmax.com