

УДК 534–13+532.526.5:621.45. [032+034.4]

Моделирование пульсирующего отрывного турбулентного течения газа в каналах холодильных установок при наличии положительного градиента давления

С. В. БОЛДЫРЕВ, канд. техн. наук А. В. БОЛДЫРЕВ¹д-р техн. наук И. Х. ИСРАФИЛОВ²,¹alexeyboldyrev@mail.ru, ²irmaris@yandex.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

Проведено численное моделирование пульсирующего отрывного турбулентного течения сжимаемого газа в диффузорном канале за диафрагмой в осесимметричной постановке. Применена высокорейнольдсовая квадратичная модель турбулентности. Получены данные о распределении коэффициентов трения и давления на стенке канала, а также о распределении кинетической турбулентной энергии на оси канала при числе Рейнольдса $Re = 33000$ для трех значений угла α между осью и стенкой канала. Для цилиндрической трубы (при $\alpha = 0^\circ$) достигнуто хорошее соответствие результатов моделирования экспериментальным данным по значению критического числа Струхала $Sh = 0,054$, соответствующего минимальной длине отрывной зоны. Выявлено, что в рассматриваемых условиях его значение почти не изменяется в диапазоне углов от 0° до $+3^\circ$. При угле $\alpha = +1^\circ$ обнаружено более значительное сокращение протяженности рециркуляционной области по сравнению с наблюдаемым в цилиндрической трубе, при угле $+3^\circ$ замечена лишь стабилизация размеров отрывной зоны в диапазоне чисел Струхала $Sh = 0,05 \dots 0,0076$. Модели турбулентности, использующие подход Рейнольдса (RANS), завышают значение длины рециркуляционной области в отрывном турбулентном течении при больших частотах наложенных пульсаций, поэтому требуются дополнительные исследования для уточнения полученных результатов. Данные о значении критического числа Струхала можно использовать для изучения возможностей управления отрывом пограничного слоя в диффузорных каналах с диафрагмами.

Ключевые слова: численное моделирование, пульсирующее течение, отрывное течение, турбулентное течение, градиент давления.

Simulation of pulsated separated turbulent gas flow with positive pressure gradient in refrigerating systems channels

S. V. BOLDYREV, Ph. D. A. V. BOLDYREV¹, D. Sc. I. Kh. ISRAPHILOV²,¹alexeyboldyrev@mail.ru, ²irmaris@yandex.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

Numerical simulation of compressible gas pulsated separated turbulent flow in diffuser behind diaphragm in axisymmetric setup is carried out. High-Reynolds number quadratic turbulence model is applied. The data for distribution of skin-friction and pressure coefficients on channel wall and of kinetic turbulent energy along channel axis are obtained at $Re = 33000$ for three values of α angle between the channel axis and wall. The good agreement between the simulation results and the experimental data with regard to the critical Strouhal number value (Sh) of 0.054 (which determines minimal length of separated zone) is achieved for cylindrical channel ($\alpha = 0^\circ$). Under conditions in question it has been observed that critical Strouhal number value had no detectable fluctuation in the α angle range between 0° and $+3^\circ$. More significant reduction of recirculating zone length by comparison with the one observed in cylindrical channel is at α angle value of $+1^\circ$, whereas just slight stabilization of the separation zone size in the Strouhal number range from 0.05 to 0.0076 is discovered at the angle of $+3^\circ$. It has been known that RANS equations applying in turbulent models leads to overestimation of recirculating zone length in separated turbulent flow at high frequencies of imposed pulsations and thus additional researches are necessary for improvement of the results obtained. Nevertheless, the data of critical Strouhal number value might be useful for the research of the boundary layer separation control possibilities.

Keywords: numerical simulation, pulsated flow, separated flow, turbulent flow, pressure gradient.

На сегодняшний день проектирование новых технических устройств требует учесть при разработке их конструкций всё более растущие требования по энергоэффективности, ресурсосбережению, экологической безопасности, надежности, окупаемости и т. п. [1–3]. Применительно к агрегатам и установкам, относящимся к технике низких температур и аппаратам пищевых производств, основой работы которых часто является движение жидких и газообразных сред, это означает обеспечение необходимых характеристик и структуры течения в проточной полости. Причем, на параметры потока могут оказывать влияние различные возмущающие факторы: силы поверхностного натяжения [4], кавитация [5], теплоотдача [6], градиент давления [7], отрыв пограничного слоя [8], наложенные периодические колебания [9–12], турбулентность и др. Как следует из анализа научных публикаций по данной тематике, при экспериментальных и теоретических исследованиях подобных сложных течений особый интерес представляет результат совместного воздействия нескольких возмущений.

Например, Driver D. M. в ходе экспериментов обнаружил, что знак и величина продольного градиента давления в течении в канале с обратным уступом влияет на координату точки присоединения оторвавшегося потока: при положительных значениях (расширяющийся канал) — удлинение отрывной зоны, а при отрицательных (сужающийся канал) — сокращение [7]. Кроме того, было отмечено, что наличие положительного градиента давления приводит к увеличению уровня кинетической турбулентной энергии в потоке за точкой присоединения и вызывает большее распространение пульсаций вниз по течению от обратного уступа.

Авторами Yoshioka S. et al. [9] экспериментально установлено, что максимальное сокращение длины отрывной зоны при периодическом ддуве/отсосе через тонкую щель в стенке обратного уступа высотой H соответствует критическому числу Струхала $Sh = (f_e \cdot H)/U = 0,19$. По мнению авторов, изменение протяженности рециркуляционной зоны связано со срывом больших вихрей, возникающих при расширении оторвавшегося сдвигового слоя и генерирующих повышенный уровень рейнольдсовых напряжений в потоке.

В работе Šarić S. et al. [10] показана возможность нахождения, соответствующего экспериментальным

данным [9], расчетного значения критического числа Струхала при использовании как методов моделирования больших вихрей (LES) и моделирования отсоединенных вихрей (DES), так и полуэмпирических моделей турбулентности Спаларта — Аллмараса и $k-\omega$ SST. Тем не менее, авторами обнаружено, что применение моделей турбулентности, построенных на основе подхода Рейнольдса, приводит к занижению эффекта сокращения длины рециркуляционной области.

В экспериментах Давлетшина И. А. и др. [11, 12] исследовано отрывное турбулентное течение воздуха за диафрагмой радиусом $R_0 = 20$ мм в канале радиусом $R = 32$ мм и длиной $L_2 = 468$ мм, наложенные пульсации в котором генерировались за счет вращения с заданной угловой скоростью заслонки в выходном сечении канала. Для всех режимов течения по числу Рейнольдса $Re = (U_0 h)/\nu = 9000; 17000; 33000$ (здесь $h = R - R_0$) при относительной амплитуде колебаний скорости $\beta_U = A_U/U \approx 0,3$ критическое число Струхала составило $Sh = (f h)/U \approx 0,134$, причем средняя во времени протяженность отрывной зоны за диафрагмой сократилась почти в 2 раза.

В настоящей работе в ходе численного моделирования исследовано влияние положительного продольного градиента давления, создаваемого за счет расширения канала, на локальные характеристики рассмотренного выше пульсирующего отрывного турбулентного течения [11, 12]. Таким образом, на отрывную зону за диафрагмой одновременно воздействовали несколько возмущающих факторов (турбулентность, наложенные пульсации и градиент давления), что характерно для течений жидкостей и газов в реальных технических устройствах.

Составлена математическая модель нестационарного отрывного турбулентного течения вязкого сжимаемого газа, включающая в себя осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, неразрывности и энергии [13, 14], уравнение состояния идеального газа, уравнения представленной в статье Lien F. S. et al. [15] высокорейнольдсовой квадратичной $k-\varepsilon$ модели турбулентности со стандартными пристеночными функциями.

Выбор нелинейной $k-\varepsilon$ модели турбулентности обусловлен:

— выводами, сделанными Thangam S. et al. [8] по результатам расчетов отрывных турбулентных потоков за обратным уступом, о том, проблемы при использовании

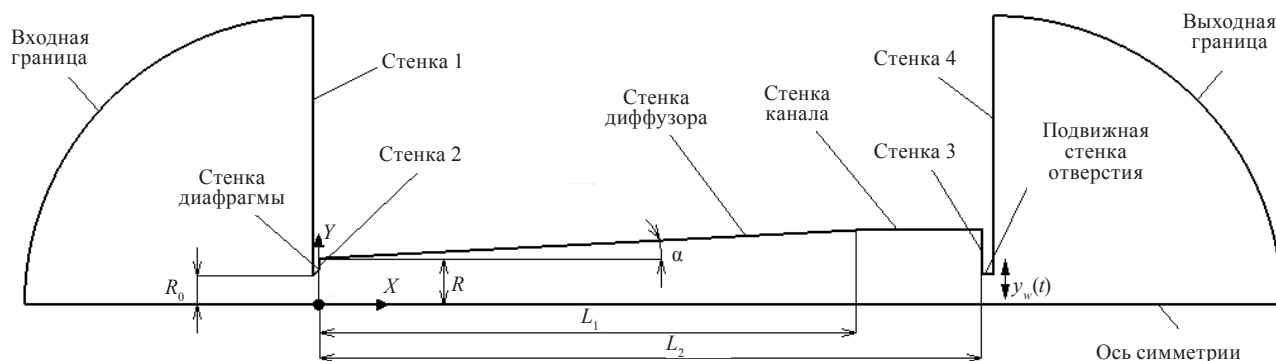


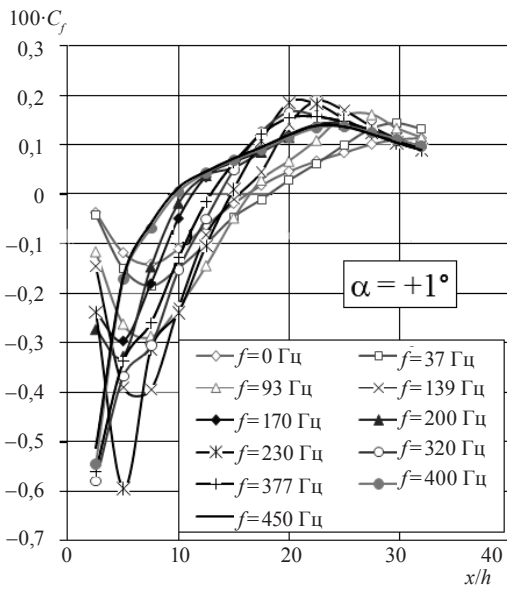
Рис. 1. Схема расчетной области. Граничные условия

линейных $k-\epsilon$ моделей чаще всего связаны с недостатками расчетной сетки, а также с невозможностью учесть анизотропию турбулентного течения;

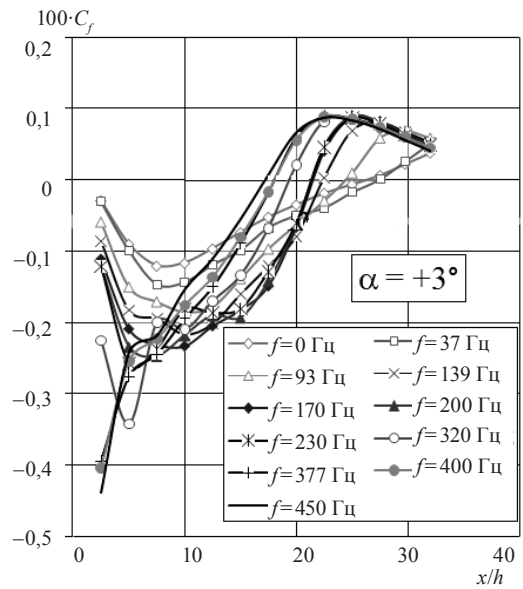
— соответствием экспериментальным данным [7] профилей скорости в поперечных сечениях и распределений коэффициентов трения и давления на стенках канала, полученным при использовании квадратичной $k-\epsilon$ модели [15] для предсказания характеристик отрывного турбулентного течения за обратным уступом при наличии продольного градиента давления [16].

Численные эксперименты проведены в осесимметричной постановке в лицензионном программном пакете STAR-CCM+ 8.02.011.

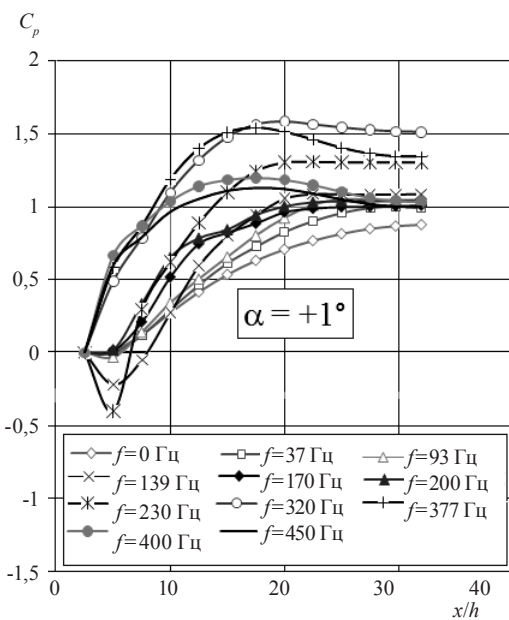
Форма и размеры расчетной области (рис. 1) определены в соответствии с исходными данными экспериментальной установки [11, 12]. Однако цилиндрическая труба заменена диффузорным каналом длиной $L_1 = 387$ мм. В качестве параметра, характеризующего продольный градиент давления, подобно экспериментам [7], выбран угол α между осью и стенкой канала, принимающий значения из диапазона $\alpha = 0^\circ \dots +3^\circ$. Расчеты проведены для режима с числом Рейнольдса $Re = (U_0 h)/\nu = 33000$ при различной частоте наложенных пульсаций f из диапазона 0–450 Гц и при относительной амплитуде колебаний скорости $\beta_U = A_U/U$ на оси канала в точке с координатой $x/h = 2,5$ от 0,2 до 0,5.



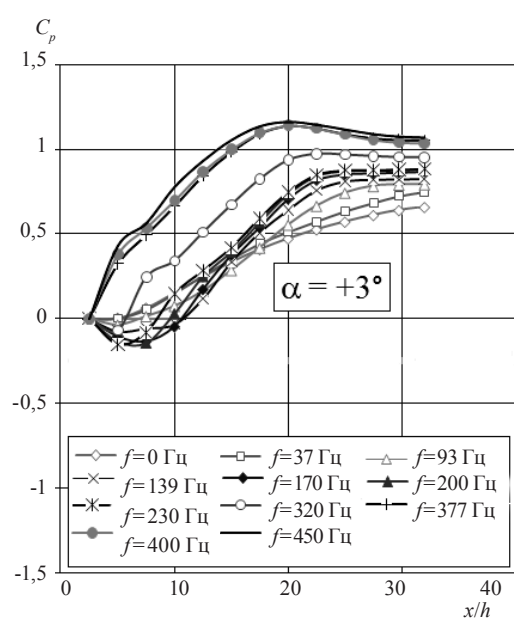
а



б



в



г

Рис. 2. Распределение осредненных коэффициентов трения (а, б) и давления (в, г) вдоль стенки канала при разной частоте f для двух значений угла α

Граничные условия определены в соответствии с предварительно проведенными исследованиями [17]. Вдвигание воздуха из атмосферы и попадание из канала в ресивер смоделировано с помощью полусферических областей. На входе в расчетную область задано постоянное статическое давление, на выходе — постоянный средний массовый расход, определяемый в зависимости от числа Рейнольдса. Наложённые пульсации созданы путем периодического изменения во времени площади выходного сечения канала $S(t) = S_{CP} (1 + \beta_s \sin(2 \cdot 3,14 \cdot f \cdot t))$ с использованием деформируемой расчетной сетки в данной зоне (среднее значение площади $S_{CP} \approx 14 \text{ см}^2$, относительная амплитуда $\beta_s \approx 0,7$), причем изменение во времени поперечной координаты стенки выходного отверстия канала найдено как $y_w(t) = \sqrt{S(t)/3,14}$. На стенках расчетной области использованы условия «непроницаемости» и «непроскальзывания» (продольная и поперечная проекции скорости равны нулю), на оси канала — условие «оси симметрии».

Для дискретизации расчетной области построены сетки из 42000–55000 квадратных ячеек (размер ячеек в канале не выше 0,6 мм). Нормальный по отношению к стенке размер пристеночных ячеек выбран в соответствии с условием использования пристеночных функций $y^+ = 30\text{--}60$.

При решении каждой нестационарной задачи в качестве начального приближения использовано решение квазистационарной задачи ($f = 0$ Гц). Для ускорения расчета шаг по времени плавно уменьшался с $\Delta t = 0,01$ с до окончательного значения, выбранного из условия $\Delta t \approx 1/(30f)$ (но не более чем 10^{-4} с), чтобы корректно моделировать высокочастотные колебания. Число итераций внутри каждого временного шага назначено из условия стабилизации уровня среднеквадратичных невязок, а максимальное время моделирования — из условия стабилизации средних во времени интегральных параметров потока.

При анализе результатов моделирования использованы следующие безразмерные характеристики:

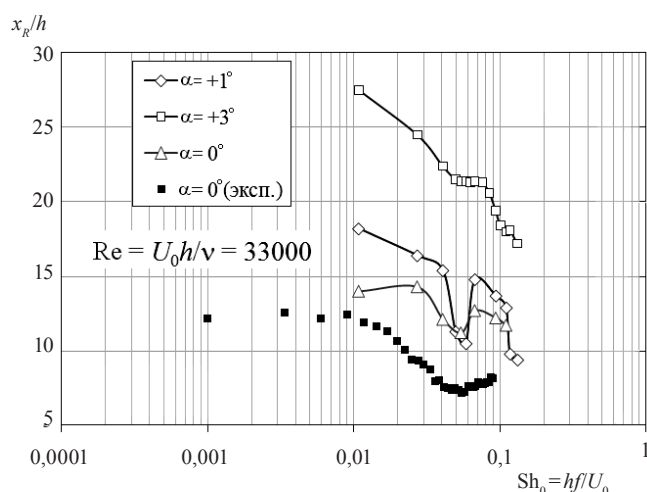


Рис. 3. Зависимость осредненной во времени относительной длины отрывной зоны от числа Струхала при разных значениях угла α

1) число Струхала $Sh_0 = hf/U_0$, определенное по средней во времени среднерасходной скорости в отверстии диафрагмы U_0 ;

2) осредненные во времени (по периоду наложенных пульсаций) коэффициенты поверхностного трения $C_f = \tau_{wX}/(0,5\rho U_0^2)$ и давления $C_p = (p - p_0)/(0,5\rho U_0^2)$, где τ_{wX} — продольная компонента касательного напряжения на стенке канала, ρ — плотность газа, p — давление на стенке канала, p_0 — давление на стенке в точке с координатой $x/h = 2,5$.

Для определения координаты точки присоединения оторвавшегося потока x_R применено условие равенства нулю продольной составляющей касательного напряжения на стенке канала.

Анализируя распределения коэффициентов поверхностного трения и давления на стенке канала (рис. 2, см. стр. 87) можно заметить:

— на квазистационарных режимах течения с ростом угла α длина отрывной зоны увеличивается, а давление на стенке уменьшается;

— часть кривых, соответствующая низким частотам, почти повторяет квазистационарные зависимости, в то время как другая часть, соответствующая более высоким частотам, заметно от них отличается. В целом, с ростом частоты f увеличивается давление, уменьшается длина отрывной зоны x_R , а коэффициент трения в ее пределах растет по модулю.

В ходе сравнения экспериментальной [11, 12] и расчетной зависимостей длины отрывной зоны от числа Струхала при $\alpha = 0^\circ$ (рис. 3) подтвержден вывод Šarić S. et al. [10] о том, что модели турбулентности, использующие подход Рейнольдса, можно использовать для нахождения значения критического числа Струхала Sh_{KP} . Обнаружено, что в диапазоне углов $\alpha = 0 \dots 3^\circ$ значение критического числа Струхала почти не изменяется $Sh_{KP} \approx 0,054$. Однако, если при угле $\alpha = +1^\circ$ выявлено более значительное сокращение протяженности отрывной области по сравнению с наблюдаемым в цилиндрической трубе, то при $\alpha = +3^\circ$ замечена лишь стабилизация размеров отрывной зоны в диапазоне чисел Струхала $Sh = 0,05 \dots 0,076$.

Установлено, что при всех рассмотренных значениях угла α (рис. 3) уровень безразмерной энергии турбулентных пульсаций на пульсирующих режимах выше, чем на квазистационарных режимах (рис. 4). Замечено, что с ростом частоты наложенных пульсаций значения кинетической турбулентной энергии сначала растут, достигая максимума при критическом числе Струхала, затем начинают снижаться. Причем положение экстремума интенсивности турбулентных пульсаций с увеличением частоты f постепенно смещается вверх по течению к диафрагме. Подобные выводы сделаны в работе [12] по данным экспериментального исследования пульсирующего отрывного течения в цилиндрической трубе ($\alpha = 0^\circ$). Однако для варианта с углом $\alpha = +1^\circ$ при значениях частоты наложенных пульсаций 170 и 200 Гц, соответствующих числам Струхала в окрестности $Sh_{KP} \approx 0,054$ и минимальным длинам отрывной области $x_R/h = 10,5 \dots 11,2$, обнаружено снижение уровня кинетической турбулентной энергии до квазистационарных значений с максимумом в точке с координатой $x/h = 22,5$.

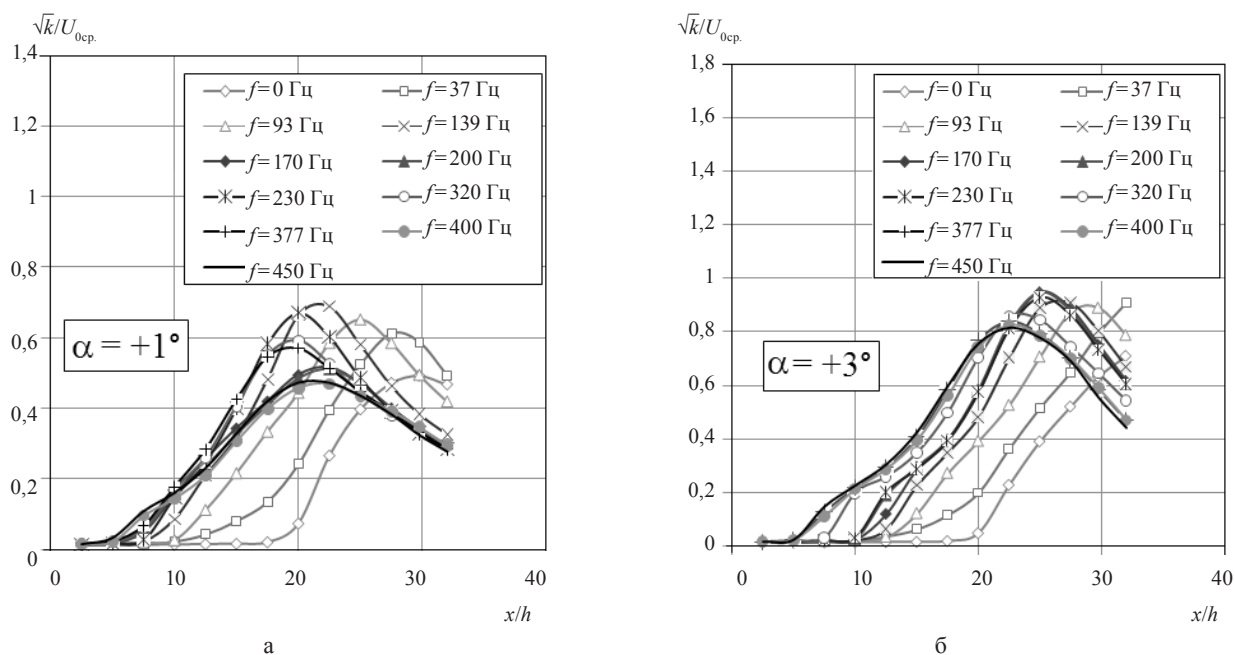


Рис. 4. Распределение безразмерной кинетической турбулентной энергии вдоль оси канала при разной частоте f для двух значений угла α

Слабая чувствительность к наложенным пульсациям моделей турбулентности, использующих подход Рейнольдса (RANS), приводит к завышению длины рециркуляционной области при больших частотах f [10], поэтому требуются дополнительные исследования для уточнения полученных результатов.

Тем не менее, данные о критическом числе Струхала можно использовать для изучения возможностей управления отрывом пограничного слоя в диффузорных каналах с диафрагмами.

Список литературы

1. Ховалыг Д. М., Синицина К. М., Бараненко А. В., Цой А. П. Энергоэффективность и экологическая безопасность техники низких температур // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2014. № 1.
2. Ананьев В. В., Пеленко В. В., Картузов Е. И. Оптимальное управление рабочими органами крыльчатого смесителя // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 3. С. 292–302.
3. Алексеев Г. В., Аксенова О. И. Использование математического моделирования для ресурсосберегающих пищевых производств // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 3.
4. Пеленко В. В. и др. Учет сил поверхностного натяжения в математической модели тепломассопереноса при осушке поверхностной влаги сухофруктов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. № 4.
5. Алексеев Г. В., Вороненко Б. А., Кондратов А. В., Схлянов А. А. Кавитационное измельчение пищевого сырья: численные оценки и технические рекомендации // Новые технологии. 2013. № 4. С. 18–25.
6. Ховалыг Д. М., Бараненко А. В. Теплоотдача при кипении хладагентов в малых каналах // Вестник Международной академии холода. 2013. № 4. С. 3–11.
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. 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.
9. 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.
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. Давлетшин И. А. Отрыв пульсирующего потока / И. А. Давлетшин, Н. И. Михеев, В. М. Молочников // Доклады академии наук. 2007. Т. 417, № 6. С. 760–763.
12. Давлетшин И. А. Гидродинамические и тепловые процессы в пульсирующих турбулентных потоках: дис. докт. техн. наук. — Казань, 2009. 298 с.
13. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. — 7-е изд., испр. — М.: Дрофа, 2003. 840с.
14. Белов, И. А. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие / И. А. Белов, С. А. Исаев. — СПб.: Балтийский государственный технический университет, 2001. 108 с.
15. 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.

16. Болдырев С. В. Эффективность использования квадратичных моделей турбулентности для моделирования отрывных течений в технологических установках / С. В. Болдырев, А. В. Болдырев, И. Х. Исрафилов, С. И. Харчук // Вестник Международной академии холода. 2014. № 4. С. 68–74.
17. Болдырев С. В. Влияние граничных условий и параметров решателя на результаты численного моделирования пульсирующего отрывного турбулентного течения / С. В. Болдырев, А. В. Болдырев // Сборник докл. итог. науч. конф. проф.-препод. состава Набережночелнинского института КФУ (Набережные Челны, 5 февр. 2014 г.). В 3-х ч. Часть 1. — Набережные Челны, 2014. С. 409–414.

References

- Khovalyg D. M., Sinitsyna K. M., Baranenko A. V., Tsoi A. P. Energy efficiency and ecological safety technicians of low temperatures. *Scientific journal NIU ITMO. Series: Refrigeration and Air Conditioning*. 2014. No.1. (in Russian)
- Ananev V. V., Pelenko V. V., Kartuzov E. I. Optimal control of the working elements blade mixer. *Scientific journal NIU ITMO. Series: Processes and Equipment for Food Production*. 2014. No. 3. P. 292–302. (in Russian)
- Alexeev G. V., Aksenova O. I. Use of mathematical modeling for resursosberegayuschih food production. *Scientific journal NIU ITMO. Series: Processes and Equipment for Food Production*. 2014. No. 3. (in Russian)
- Pelenko V. V., ets. The account of forces of a superficial tension in the mathematical model of heat and mass transfer in drying of surface moisture is dried fruits. *Scientific journal NIU ITMO. Series: Processes and Equipment for Food Production*. 2013. No. 4. (in Russian)
- Alexeev G. V., Voronenko B. A., Kondratov A. V., Skhalyakhov A. A. Cavitation chopping of food ingredients: numerical evaluation and technical recommendations. *New technologies*. 2013. No. 4. P. 18–25. (in Russian)
- Khovalyg D. M., Baranenko A. V. Heat transfer of refrigerants boiling in small channels. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2013. No. 4. P. 3–11. (in Russian)
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Davletshin I. A. Separation of a pulsating flow / I. A. Davletshin, N. I. Mikheev, V. M. Molochnikov. *Doklady Physics*. 2007. Vol. 52. No. 12. P. 695–698. (in Russian)
- Davletshin I. A. Hydrodynamic and thermal processes in pulsated turbulent flows: Dissertation of Doctor of Technical Sciences. Kazan. 2009. 298 p. (in Russian)
- Loitsiansky L. G. *Fluid Mechanics*. Moscow, Drofa Publ., 2003. 840 p. (in Russian)
- Belov I. A., Isaev S. A. The modeling of turbulent flows. St. Petersburg, Baltic GTU Publ., 2001. 108 p. (in Russian)
- 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.
- Boldyrev S. V. Efficiency of quadratic turbulence models application for separated flows simulation in technological aggregates / S. V. Boldyrev, I. K. Israphilov, A. V. Boldyrev, S. I. Kharchuk. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2014. No. 4. P. 68–74. (in Russian)
- Boldyrev, S. V. Influence of boundary conditions and solver parameters on the results of numerical simulation of pulsated separated turbulent flow / S. V. Boldyrev, A. V. Boldyrev // Reports of the Final Scientific Conference of Naberezhnye Chelny Institute KFU (Naberezhnye Chelny, Feb. 5, 2014). Part 1. — Naberezhnye Chelny: Publishing center Naberezhnye Chelny Institute KFU, 2014. P. 409–414. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 29.04.2015



1st IIR International Conference
Cryogenics and Refrigeration Technology
22-25 June 2016
Bucharest, Romania

<http://iccr2016.criofrig.ro>

Under the auspice of the IIR, the 1st International Conference on Cryogenics and Refrigeration Technology represents the convergence of innovative ideas within a challenging field that is continually developing.

This new conference offers a unique opportunity to discuss research ideas and exchange knowledge and practices based on first-hand experience in cryogenic and refrigeration technologies and the applicability of these sciences in several industrial sectors such as air separation units, helium recovery and liquefaction plants, and industrial heat transfer processes.

Contact Us

Tel.: 0040 236 312437; Fax: 0040 236 463059
 E-mail: iccr2016@criofrig.ro