электронный научно-технический журнал
ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51036. ISSN 2307-0595

Постановка задачи и расчет характеристик пульсирующего отрывного турбулентного течения

08, август 2015

Болдырев С. В.[1], Болдырев А. В.[1,*], Харчук С. И.[2]

УДК: 519.63:532 [526.5+542.4+595.7]

[1]Россия, Набережночелнинский институт (филиал) “Казанский (Приволжский) федеральный университет”
[2]Казанский государственный энергетический университет
*alexeyboldyrev@mail.ru

Введение

Для совершенствования конкретного гидро- или пневмоаппарата, необходима достоверная информация о локальных и интегральных характеристиках и структуре течения одно- или многофазной среды. Особый интерес представляют сложные течения с совместным воздействием на поток нескольких возмущений (турбулентность [1], наложенные пульсации [2], кривизна и вращение стенок и др.). Например, исследование наложенных пульсаций в отрывном турбулентном течении позволяет разработать новые способы интенсификации теплообмена или управления отрывом пограничного слоя [3], либо предупредить возникновение неустойчивых режимов работы устройств, повышенного шума, вибраций, быстрого износа деталей и т.п. Этим объясняется интерес исследователей к данному классу течений.

Повышенные требования к динамическим характеристикам средств измерения создает определенные трудности для получения информации о пространственно-временной структуре подобных сложных потоков в достаточно большой области [4].

Использование в качестве альтернативы численных методов подразумевает решение дополнительных задач [5], связанных с составлением адекватной математической модели, с качественной дискретизацией расчетной области, учитывающей различные особенности течения, с корректным выбором начальных и граничных условий и т.п.

Причем, применительно к пульсирующим отрывным турбулентным течениям пока не существует одновременно надежных и экономичных моделей турбулентности. Например, применение перспективных гибридных методов [6], таких как моделирование больших вихрей (LES) или моделирование оторвавшихся вихрей (DES), требует наличия вы-

сокопроизводительных вычислительных ресурсов, особенно при изучении потоков в сложных технических устройствах.

Поэтому в настоящей работе исследованы возможности одной из полуэмпирических моделей турбулентности применительно к расчету осесимметричного пульсирующего отрывного турбулентного течения вязкого сжимаемого газа за диафрагмой, расположенной на входе в цилиндрический канал.

Материалы и методы

Составлена математическая модель течения [6-8], включающая в себя осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса и неразрывности (RANS), уравнение идеального газа (для учета сжимаемости), дифференциальное уравнение энергии, уравнения стандартной высокорейнольдсовой квадратичной *k*-ε модели турбулентности со стандартными пристеночными функциями (записаны в тензорной форме):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot V_j)}{\partial x_j} = 0, \tag{1}$$

$$\rho \cdot \frac{\partial V_i}{\partial t} + \rho \cdot V_j \cdot \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \mathrm{P}_{ji}}{\partial x_j} \tag{2}$$

$$\rho \cdot \frac{\partial E}{\partial t} + \rho \cdot V_j \cdot \frac{\partial E}{\partial x_j} = -\frac{\partial q_j}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mathrm{P}_{ji} \cdot V_i); \tag{3}$$

$$\rho = \frac{p_{ATM} + p}{R \cdot T}; \tag{4}$$

$$\rho \cdot \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \cdot V_j \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k - \rho \cdot \varepsilon - \rho \cdot \Psi_M, \tag{5}$$

$$\rho \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \cdot V_j \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + \frac{1}{C_T} \cdot (C_{\varepsilon 1} \cdot G_k - C_{\varepsilon 2} \cdot \rho \cdot \varepsilon), \tag{6}$$

где i, j – индексы, принимающие значения 1, 2, 3;

ρ – плотность газа, кг/м^3;

t – время, с;

V – вектор скорости движения жидкости, м/с;

x – координата, м;

P – тензор напряжений, Па;

E – полная энергия газа, Дж/кг;

q – вектор плотности теплового потока, Вт/м^2;

p_{ATM} – атмосферное давление, Па;

p – избыточное давление, Па;

R – газовая постоянная, Дж/(кг·К);

T – абсолютная температура газа, К;

k – кинетическая турбулентная энергия, Дж/кг;

μ – молекулярная динамическая вязкость газа, Па·с;

μ_t – турбулентная динамическая вязкость газа, Па·с;

σ_k, σ_ε, C_T, $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ – константы модели турбулентности;

G_k – компонент, учитывающий генерацию энергии k, Дж/(м^3·с);

ε – скорость диссипации кинетической турбулентной энергии, Вт/кг;

Ψ_M – компонент, учитывающий влияние сжимаемости среды на пульсации скорости движения жидкости, Вт/кг.

Форма и размеры расчетной области максимально приближены к параметрам установки, используемой в экспериментах [4, 10], данные которых применены для верификации математической модели.

На входной границе (рис. 1) задано статическое давление, на выходной – средний по периоду колебаний массовый расход.

В экспериментах [10] наложенные пульсации расхода созданы вращением заслонки, периодически перекрывающей выходное отверстие канала. В настоящей работе для достижения данной цели применено изменение во времени площади выходного сечения канала S(t) с использованием деформирующихся расчетных сеток (рис. 1).

Всасывание воздуха из атмосферы и попадание из канала в ресивер смоделировано с помощью специальных входной и выходной полусферических областей [11].

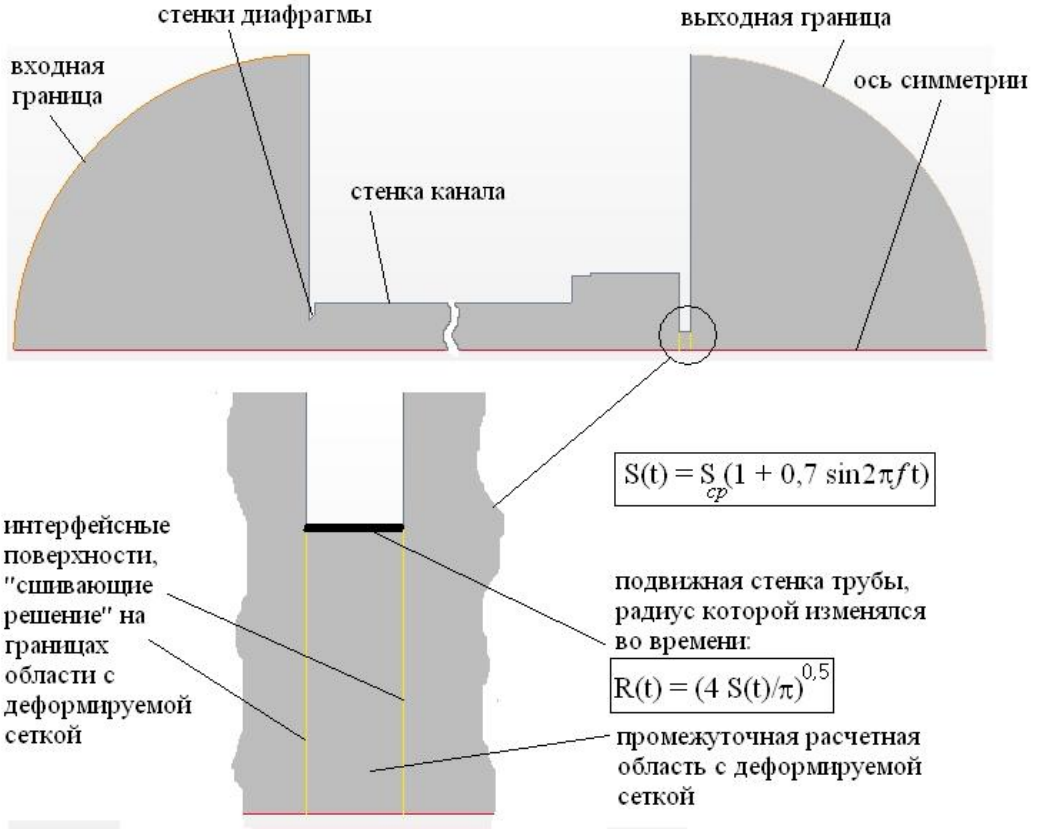


Рис. 1. Схема расчетной области. Граничные условия

Решение поставленной задачи итерационным методом реализовано в лицензионном программном пакете STAR-CCM+.

Построена расчетная сетка, содержащая 1,6 млн. квадратных ячеек с измельчением вблизи стенок и в зоне обратного течения.

Расчеты проведены при среднем расходе воздуха 191,89 м^3/ч (среднерасходная скорость в канале U = 16,7 м/с) и относительной амплитуде колебаний 0,7 в диапазоне частот наложенных пульсаций f^* = 37÷377 Гц.

Число итераций N внутри каждого временного шага ($\Delta t = 10^{-6}$ с) выбрано из условия снижения среднеквадратичных невязок по каждому уравнению до значения 10^{-4}.

Значения коэффициента поверхностного трения вычислены вдоль стенки канала через каждые 10^{-4} с и осреднены за период наложенных пульсаций:

$$C_F = \frac{\tau_{WX}}{\left(0{,}5 \cdot \rho \cdot U^2\right)}, \qquad (7)$$

где τ_{WX} – продольная составляющая касательного напряжения на стенке, Па.

Значение средней за период наложенных колебаний протяженности зоны рециркуляции за диафрагмой найдено по положению точки присоединения оторвавшегося потока, которое, в свою очередь, определено по условию равенства нулю продольной составляющей касательного напряжения на стенке $\tau_{WX} = 0$.

Результаты

В ходе численного моделирования удалось качественно повторить наблюдаемую в натурных экспериментах эволюцию отрывной зоны, вызванную наложенными пульсациями расхода.

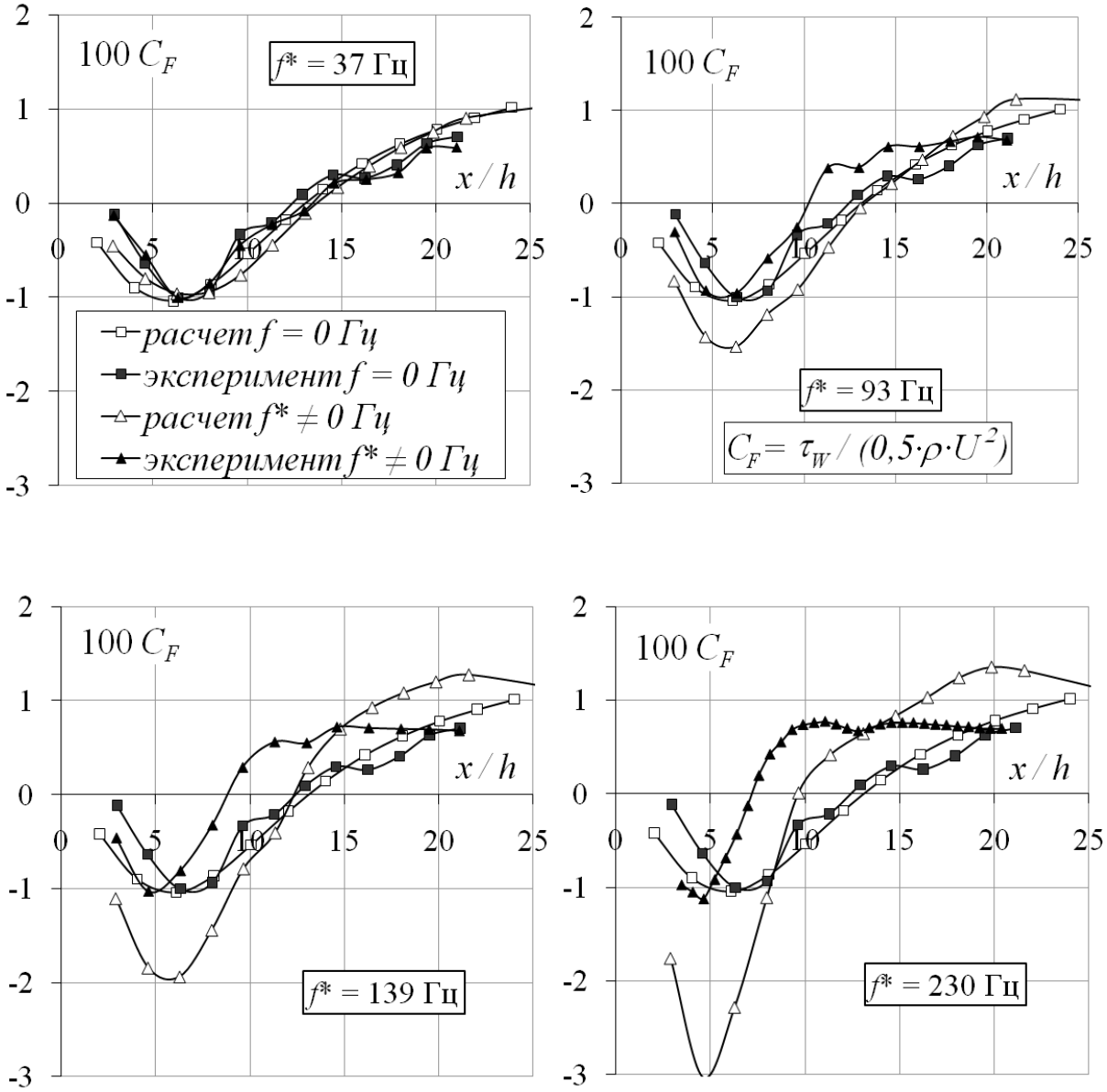
На квазистационарном режиме, а также при низких частотах f^*, достигнуто удовлетворительное соответствие расчетных значений коэффициента поверхностного трения экспериментальным данным [10], как в зоне рециркуляции, так и за точкой присоединения оторвавшегося потока (рис.2).

При больших частотах получено описанное в работе [4] значительное сокращение средней за период наложенных пульсаций длины отрывной зоны по отношению к квазистационарному течению (рис.2). Однако, необходимо отметить, что данный эффект сильно занижен по сравнению с экспериментом.

Обнаружено, что погрешность расчета поверхностного трения в рециркуляционной зоне невелика при низкочастотных пульсациях, но значительно увеличивается с ростом частоты f^*. По-видимому, в расчетах завышены скорости движения воздуха в зоне рециркуляции.

Подтверждено наличие резкой границы между низкочастотными и высокочастотными режимами течения по числу Струхаля (рис.2). Однако по сравнению с экспериментом положение минимума относительной длины отрывной зоны смещено в область больших значений частот наложенных пульсаций.

Возможными причинами отклонения результатов расчета локальных характеристик потока от экспериментальных данных [4, 10] является тот факт, что модели турбулентности класса RANS [6], в том числе учитывающие анизотропию отрывного турбулентного течения [1, 8], не способны предсказать формирование и поведение вихревых структур, обнаруженных экспериментально в оторвавшемся от кромки диафрагмы слое смешения, на границе между основным течением и зоной рециркуляции [2, 3].



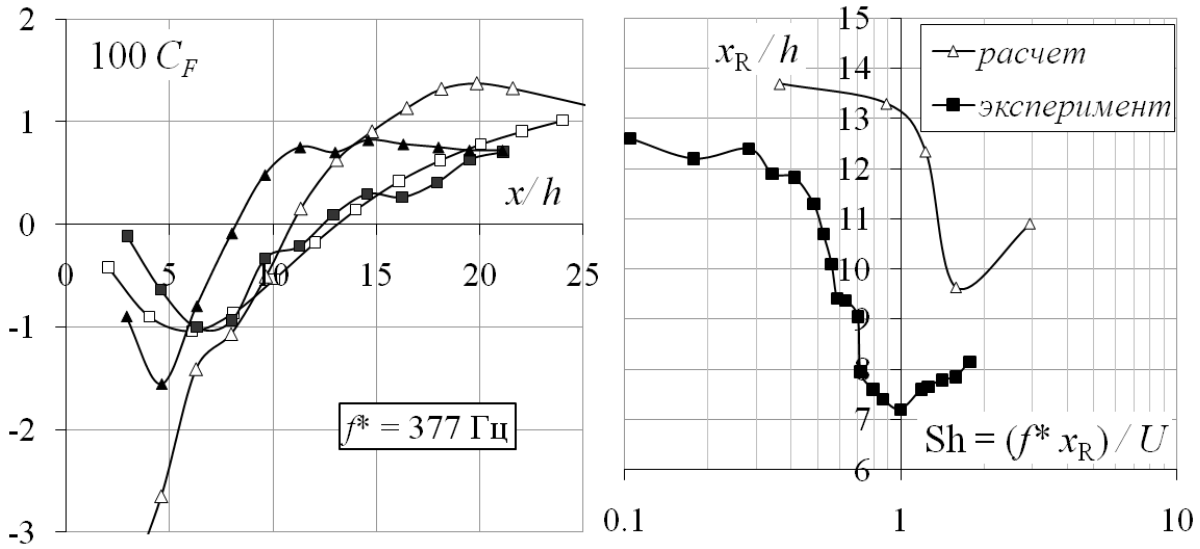


Рис. 2. Распределение коэффициента поверхностного трения C_F вдоль стенки канала и относительная длина отрывной области x_R/h при различных значениях частоты пульсаций f^*

Заключение

Полученные результаты численного моделирования качественно соответствуют экспериментальным данным и подтверждают сложную нестационарную вихревую структуру отрывного пульсирующего течения. Достигнуты удовлетворительные количественные результаты по распределению коэффициента поверхностного трения на стенке канала при малых значениях частот наложенных пульсаций. Подтверждено резкое сокращение длины отрывной области между низкочастотными и высокочастотными режимами течения по числу Струхаля, однако используемая математическая модель приводит к занижению данного эффекта. Сделан вывод о необходимости модификации квадратичной k-ε модели турбулентности для более адекватного учета влияния наложенных пульсаций на параметры течения.

Список литературы

1. Thangam S., Speziale C.G. Turbulent flow past a backward-facing step: a critical evaluation of two-equation models. // AIAA journal. 1992. Vol.30. No.5. P. 1314-1320.
2. Yoshioka S., Obi S., Masuda S. Organized vortex motion in periodically perturbed turbulent separated flow over a backward-facing step. // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2001. Vol. 22. No. 3. P. 301-307.
3. Šarić S., Jakirlić S., Tropea C. A periodically perturbed backward-facing step flow by means of LES, DES and T-RANS: An example of flow separation control. // Journal of Fluids Engineering. Transactions of the ASME. 2005. Vol. 127. No. 5. P. 879-887.
4. Давлетшин И.А. Гидродинамические и тепловые процессы в пульсирующих турбулентных потоках: дис. ... докт. техн. наук. Казань. 2009. 298 с.

5. 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.
6. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений: учебное пособие. СПб.: Балтийский государственный технический университет. 2001. 108 с.
7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. 7-е изд., испр. М.: Дрофа. 2003. 840с.
8. 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). 1996.
9. Болдырев С.В., Болдырев А.В., Исрафилов И.Х., Харчук С.И. Эффективность использования квадратичных моделей турбулентности для моделирования отрывных течений в технологических установках. // Вестник Международной академии холода. 2014. № 4. С. 68-74.
10. Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Молочников В.М. Отрыв пульсирующего потока // Доклады академии наук. М.: Наука. 2007. Т. 417. № 6. С. 760-763.
11. Болдырев А.В., Болдырев С.В., Мулюкин В.Л., Харчук С.И., Харчук С.С. Обеспечение независимости численного расчета отрывного течения от размеров входной добавленной области // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. №6. С. 22-25.