

УДК 533.6.011.35

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ КАВЕРН И ОТСЕКОВ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ПОТОКОМ ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Е.В. ЛАРИНА¹, И.А. КРЮКОВ^{1,2}, И.Э. ИВАНОВ^{1,3}

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Россия

²Институт проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского, г. Москва, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (№ 16-38-60185, №16-01-00444а).

Работа направлена на развитие и применение программного комплекса моделирования высокоскоростных турбулентных течений газа. Рассмотрены двумерные нестационарные течения в кавернах и отсеках и трехмерные течения в отсеке сложной геометрии. Используются две параметрические модели турбулентности.

Проведено численное моделирование нестационарного трансзвукового течения с числом Маха набегающего потока $M_\infty = 0,74$ в узком канале с мелкой каверной внутри. Получены зависимости статического давления в фиксированных точках пространства от времени. Показано, что отличие результатов обработки данных численного моделирования с использованием быстрого преобразования Фурье от экспериментальных данных составляет не более 6–10 %.

Проведено численное моделирование нестационарного трансзвукового течения с числом Маха набегающего потока $M_\infty = 0,85$ в мелкой каверне. Получены низкочастотные колебания статического давления в нескольких фиксированных точках пространства. Спектральные функции колебаний в центре каверны сопоставлены с экспериментальными данными и модами Росситера. Получено приемлемое соответствие расчетов эксперименту. Проведено исследование влияния геометрического фактора на частотные характеристики потока. Для этого к каверне добавлены круглые створки. Наличие створок привело к изменениям в самых низкочастотных модах колебаний. Исчезла первая мода, уменьшилась амплитуда второй моды и значительно уменьшилась амплитуда третьей моды. Изменение высоты выступающей во внешний поток части геометрии привело к изменениям амплитуд пульсаций давления без изменения частот. Для данного случая приводится сравнение спектральных функций, полученных с использованием двух рассмотренных моделей турбулентности. Установлено, что значения частот отличаются слабо, различия имеются в амплитудах пульсаций.

Проведено численное исследование влияния положения плоской заслонки на параметры нестационарного дозвукового течения с числом Маха набегающего потока $M_\infty = 0,65$ в цилиндрическом отсеке с внутренним телом. Рассмотрены случаи отклонения заслонки внутрь отсека с углами 26 и 41° относительно горизонтальной плоскости, а также случай без заслонки. Получены низкочастотные колебания статического давления. Наличие заслонки не изменило частот пульсаций статического давления. С ростом угла отклонения заслонки растут амплитуды колебаний во всех рассмотренных точках течения.

Ключевые слова: моделирование турбулентных высокоскоростных течений, течение в каверне, полуэмпирические модели турбулентности, k-ε модель турбулентности, μ_t -k-ε модель турбулентности.

ВВЕДЕНИЕ

Работа направлена на развитие и применение программного комплекса моделирования высокоскоростных течений газа, в которых турбулентность оказывает существенное влияние на средние параметры течения. Реализованные в данном комплексе модели турбулентности ранее применены при моделировании различных стационарных течений, например, в [1–4]. Вопрос о возможностях некоторых моделей (в частности, из [4]) при решении нестационарных задач ранее не рассматривался. Он представляет интерес с точки зрения дальнейшего использования программы расчета для моделирования пульсационных высокоскоростных течений. В качестве тестового нестационарного течения используется течение в каверне.

В настоящее время опубликовано значительное количество данных по экспериментальному и численному [5–7] изучению течения в кавернах и в выемках осесимметричных тел. Однако часть характерных аспектов остается не до конца исследованной. К ним относятся [7]: яв-

ление смены резонансных частот, топология трехмерного вихревого движения в каверне, способы управления течением в каверне. Одним из способов управления является использование створок, отделяющих каверну от окружающего потока. Такая схема соответствует отсеку летательного аппарата.

МЕТОДЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задача описывается системой осредненных по Фавру уравнений Навье – Стокса в двумерном и трехмерном случаях и уравнений модели турбулентности. Для решения полученной системы используется [3, 9] метод повышенного порядка точности по пространству TVD типа, решатель задачи Римана AUSM-M и метод Рунге – Кутты второго порядка точности для аппроксимации по времени. Уравнения для кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации используемых моделей выглядят следующим образом:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \rho(\varepsilon_S + \varepsilon_D), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon_S}{\partial t} + \frac{\partial u_i \varepsilon_S}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon_S}{\partial x_i} \right) + c_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon_S}{k} - c_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon_S^2}{k}, \quad (2)$$

где порождение кинетической энергии турбулентности, турбулентная вязкость, сжимаемая диссипация [10] и турбулентное число Маха, соответственно, выражаются по формулам

$$P_k = \left(\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_s}{\partial x_s} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad \mu_t = c_\mu \rho k / \varepsilon_S, \quad \varepsilon_D = M_t^2 \varepsilon_S, \quad M_t = \sqrt{2k/a}.$$

Значения коэффициентов: $c_\mu = 0,09$, $c_{\varepsilon 1} = 1,44$, $c_{\varepsilon 2} = 1,92$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$. В первой из используемых моделей турбулентности (модель А [1–3]) коэффициент $c_{\varepsilon 1}$ в уравнении для диссипации, отвечающий за рост диссипации, задан в виде функции [11], зависящей от параметра неравновесности $\lambda = P_k / (\rho \varepsilon_S)$ следующим образом:

$$c_{\varepsilon 1} = \tilde{c}_{\varepsilon 1} \cdot \left\{ (c_{\varepsilon 3} / \tilde{c}_{\varepsilon 1}) \cdot [(\lambda - 1) / (\lambda + 1)] \right\}, \quad \tilde{c}_{\varepsilon 1} = 1,44, \quad c_{\varepsilon 3} = 0,3.$$

Кроме модели А рассматривается трехпараметрическая μ_t - k - ε модель [4] (модель В), включающая два уравнения стандартной k - ε модели (1), (2) с учетом сжимаемой диссипации и уравнение переноса турбулентной вязкости

$$\frac{\partial \rho v_t}{\partial t} + \frac{\partial u_i v_t}{\partial x_i} = c_\tau \rho (v_{tE} - v_t),$$

где $v_{tE} = \mu_{tE} / \rho$, $\mu_{tE} = c_\mu \rho k^2 / \varepsilon_S$, $c_\tau = 0,75$. В качестве начального приближения и при постановке граничных условий для турбулентной вязкости в μ_t - k - ε модели использовалось значение равновесной турбулентной вязкости μ_{tE} .

В обеих моделях (А и В) вблизи стенки используются пристеночные функции, учитывающие градиент давления. Для ускорения счета на начальном этапе использовался локальный шаг по времени. После формирования в поле течения основных устойчивых газодинамических структур расчет проводился с использованием глобального шага. Статистика не накапливалась

до тех пор, пока колебания не становились периодическими. Для обработки данных использовано быстрое преобразование Фурье.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Тестовое течение № 1. В эксперименте [5] поток воздуха, истекающий из сужающегося сопла, протекал в узком канале. Внутри канала располагалась мелкая каверна квадратного сечения. После локального сужения (горла) поток попадал в вакуумную камеру с высоким уровнем разрежения. Параметры набегающего потока: число Маха $M_\infty = 0,74$, температура торможения 290К, скорость 243 м/с. Геометрические параметры течения: отношение длины каверны к глубине $L/D = 1$, глубина $D = 0,02$ м, высота канала равна глубине каверны $H = D$.

При моделировании данного эксперимента рассматривалось течение внутри канала с твердыми стенками и каверной. Расчет проведен по модели А в двумерной постановке. Структурированная сетка содержала 400×100 прямоугольных ячеек со сгущением к стенкам во внешней области и 120×100 ячеек в каверне. Течение в каверне открытого типа и дозвуковое с локальным увеличением скорости до трансзвука, что согласуется с экспериментом. Схематичное изображение расчетной области приводится во внутренней рамке на рис. 1. Получена зависимость расчетного статического давления в 9 точках.

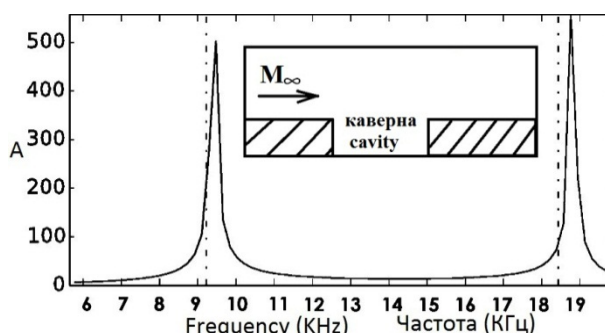


Рис. 1. Спектральная функция пульсаций статического давления. Кривая – расчет (модель А), пунктир – эксперимент [5]

Fig. 1. Power spectrum of static pressure oscillations. Solid curve corresponds to computational results (model A), dash and dot straight line corresponds to experiment [5]

Обработка результатов показала, что частоты колебаний в различных точках каверны одинаковы, отличие заключается в амплитудах. Первые две моды колебаний во всех точках получились самыми выраженными по амплитуде. Сравнение результатов расчета проведено с данными эксперимента [5] (рис. 1). На графике представлена спектральная функция пульсаций статического давления в геометрическом центре каверны. По оси абсцисс отложена частота, по оси ординат амплитуда колебаний. Сравнение показывает, что согласие с экспериментом по частотам находится в приемлемых пределах не более 10 %.

Тестовое течение № 2. Задача основана на данных статьи [6], в которой проведено подробное моделирование с использованием метода крупных вихрей и указаны значения частот из эксперимента. Параметры течения следующие: число Маха $M_\infty = 0,85$, статическое давление в камере $P_k = 1$ атм, отношение длины каверны к глубине $L/D = 5$, отношение длины каверны к ширине $L/W = 5$, глубина $D = 0,032$ м. Расчет данного течения выполнен с использованием моделей А и В в двумерной постановке. Сетка состоит из 400×100 ячеек во внешней области течения и 120×100 ячеек внутри каверны. Сетка сгущена по направлению к твердым поверхностям.

В данном тесте наблюдаются низкочастотные колебания в отличие от предыдущего случая. Картина течения, полученная в расчете, свидетельствует об открытом типе течения. Линии тока, оторвавшиеся вблизи передней кромки каверны, не достигают нижней стенки каверны. В 9 точках внутри каверны проводилась запись значений статического давления. Спектральная функция полученных колебаний давления имеет явные выделенные частоты. Для различных точек внутри каверны эти частоты одинаковы. Значения частот, полученные в расчетах по моделям А и В, отличаются несущественно. Результаты обработки зависимости статического давления от времени в геометрическом центре каверны представлены на рис. 2. Сплошными линиями показаны значения частот, найденные по эмпирической формуле Росситера [6, 12], модифицированной для больших скоростей звука:

$$f = \frac{U_\infty}{L} \frac{(m - \alpha)}{M_\infty \left[1 + M_\infty^2 (\gamma - 1)/2 \right]^{1/2} + 1/K},$$

где $\alpha = 0,062L/D$, $K = 0,57$ – эмпирические постоянные, M_∞ – число Маха набегающего потока, m – номер моды. Пунктирными линиями на рис. 2 показаны экспериментальные моды. Видно, что полученные в расчете частоты с приемлемой точностью соответствуют экспериментальным частотам и частотам Росситера для первых четырех мод. Хотя данная каверна относится к трехмерным течениям, двумерный расчет позволяет получать частоты, близкие к эксперименту. Часть частот, полученных в расчете, имеет не физическую, а численную природу.

Для данного случая изучалось влияние геометрического фактора. Для этого к исходной каверне добавлены две створки, выступающие во внешний поток. Эти створки представляют собой две дуги одной окружности. Между створками имеется отверстие, расположенное симметрично относительно боковых стенок каверны. Это отверстие соединяет внешнюю область с внутренней областью образовавшегося отсека. Схематичное изображение расчетной области приводится справа на рис. 3. Задача решается в двумерной постановке. Проведены расчеты с двумя положениями центров окружностей при одинаковой длине отверстий. Различное положение центров приводит к изменению высоты выступающей во внешний поток части геометрии.

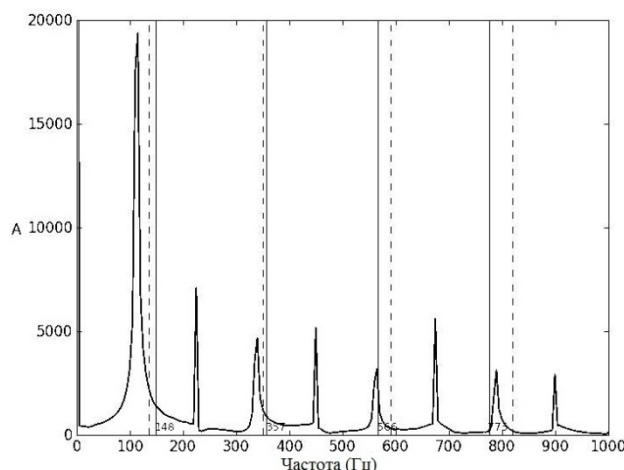


Рис. 2. Спектральная функция пульсаций статического давления. Кривая – расчет (модель А), пунктир – эксперимент [6], сплошные прямые – частоты Росситера [6, 12]

Fig. 2. Power spectrum of static pressure oscillations. Solid curve corresponds to computational results (model A), dashed straight line corresponds to experiment [6], solid straight line corresponds to Rossiter modes [6, 12]

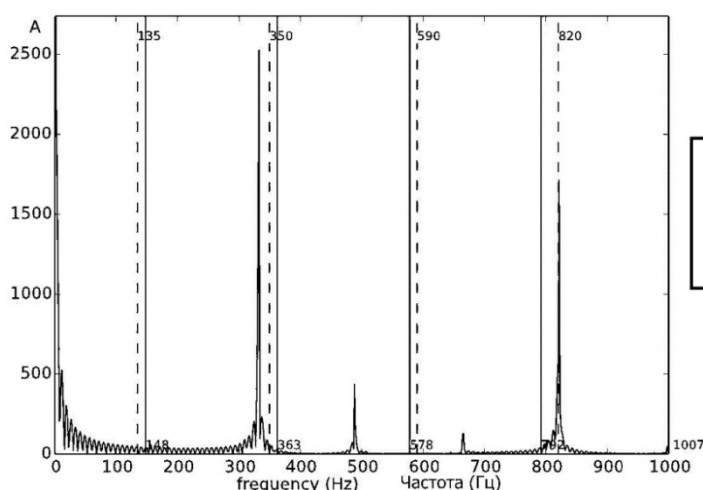
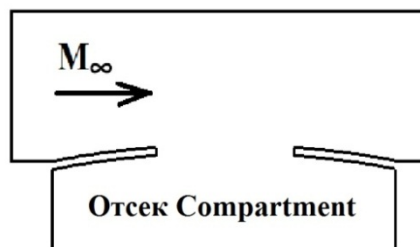


Рис. 3. Спектральная функция пульсаций статического давления.

Кривая – расчет по модели В течения в двумерном отсеке с круглыми створками, пунктир – экспериментальные частоты для каверны без створок. Справа представлена схема отсека

Fig. 3. Power spectrum of static pressure oscillations.

Solid curve corresponds to computation of flow over compartment (model B), straight dashed line corresponds to experimental frequency for cavity without door. Compartment scheme is on the right



Расчеты показали, что получаемые частоты близки по значениям. Изменение высоты выступающей в поток части геометрии приводит к изменению амплитуды пульсаций.

Результаты обработки зависимости статического давления от времени, полученные для одного из рассмотренных случаев, приведены на рис. 3, 4. Спектральная функция пульсаций статического давления рассматривается в точке, находящейся вблизи кромки задней створки. Рис. 4 соответствует модели А, а рис. 3 – модели В.

Сравнение результатов проведено с частотами, полученными в эксперименте без створок и с частотами Росситера. Поэтому часть частот не воспроизведена. Таким образом, наличие створок привело к исчезновению первой наиболее низкочастотной моды, уменьшению амплитуды колебаний второй моды и значительному уменьшению амплитуды третьей моды. Видно, что частоты, полученные по обоим моделям, совпадают. Значения амплитуд заметно отличаются. В случае модели В колебания имеют большую амплитуду по сравнению с моделью А.

Течение № 3. В работе [13] показано, что моделирование нестационарных течений в кавернах с применением используемого метода и программного комплекса позволяет достичь приемлемого соответствия двумерных и трехмерных расчетов для дозвуковых каверн определенного класса. Поэтому рассмотренные уравнения и метод применены в настоящей работе для исследования трехмерного нестационарного течения.

Задача заключалась в определении влияния положения плоской заслонки на параметры нестационарного течения в цилиндрическом отсеке с внутренним телом. Параметры набегающего потока: число Маха $M = 0,65$, статическое давление $p_{\infty} = 26500$ Па, плотность $\rho_{\infty} = 0,4135$ кг/м³, температура $T_{\infty} = 223,3$ К, динамическая вязкость $\mu_{\infty} = 1,46 \cdot 10^{-5}$ кг/(с·м). Протяженность расчетной области составляет 15 м, протяженность отсека – 8 м, длина отверстия – 1,4 м, ширина – 1 м. Расчет проводился на достаточно грубой сетке в 1 млн. ячеек, со сгущениями к стенкам и к отверстию в надстройке. Использовались тетраэдральные призматические ячейки во внешней области и шестигранные ячейки вблизи стенок. Минимальный объем ячейки составлял $0,92 \cdot 10^{-5}$ м.

Геометрия расчетной области представлена на рис. 5. На цилиндрической твердой поверхности установлена цилиндрическая надстройка с плоскими стенками и прямоугольным отверстием (рис. 5). Отверстие в надстройке соединяет отсек прямоугольного сечения и внешнюю область течения. На задней кромке отверстия может быть расположена заслонка, отклоняющаяся внутрь полости. Рассмотрены случаи углов отклонения заслонки от горизонтальной плоскости ($y = \text{const}$) 26 и 41°, а также случай без заслонки. На рис. 5 изображена картина мгновенной плотности вблизи заслонки. Вихри, сходящие с передней кромки отверстия в надстройке, сносятся течением вверх по потоку, приводят к возникновению колебаний статического давления. Волны статического давления отражаются от заслонки и задней кромки отверстия, распространяются вверх по потоку и воздействуют на вихри, сходящие с кромки. Устанавливается автоколебательный режим, проявляющийся в виде выделенных частот колебаний статического давления. На рис. 5 заметны локальные области пониженной плотности, соответствующие области с наибольшей амплитудой колебаний параметров течения. На рис. 5 изображена мгновенная кар-

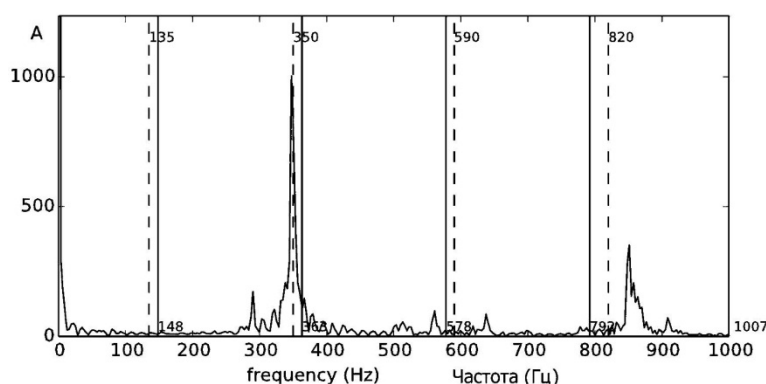


Рис. 4. Спектральная функция пульсаций статического давления. Кривая – расчет по модели А течения в двумерном отсеке с круглыми створками, пунктир – экспериментальные частоты для каверны без створок
Fig. 4. Power spectrum of static pressure oscillations. Solid curve corresponds to computation of flow over compartment (model A), straight dash line corresponds to experimental results of cavity flow problem [6], solid straight line corresponds to Rossiter modes of cavity flow [6, 12]

тина статического давления в области течения. Образующемуся при обтекании надстройки вихревому следу соответствуют заметные неоднородности давления.

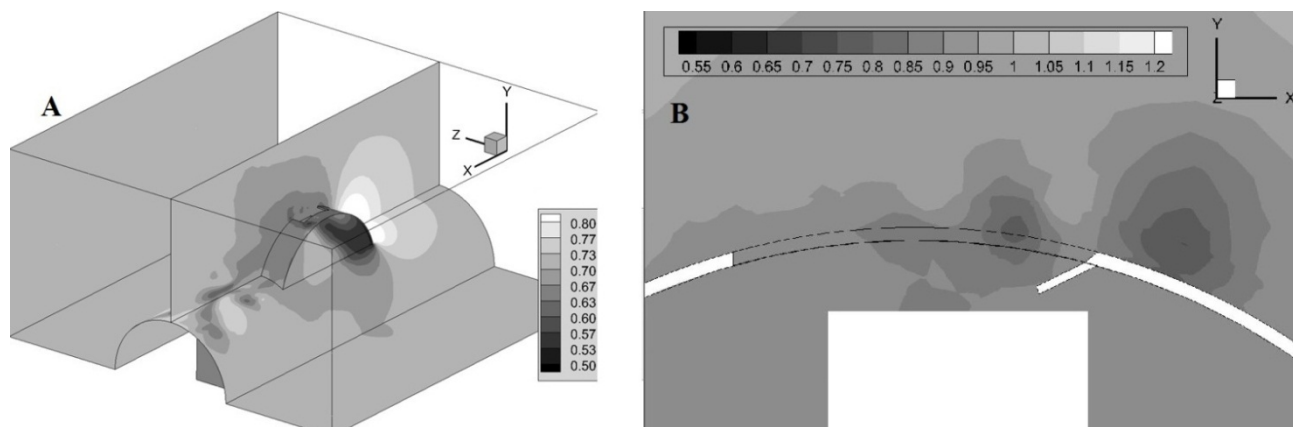


Рис. 5. Цилиндрический отсек с внутренним телом и отклоняющейся заслонкой, установленной под углом 41° относительно горизонтали:

- A – внешняя геометрия, раскраска соответствует значениям статического давления;
- B – внутренняя геометрия; раскраска соответствует значениям плотности

Fig. 5. Flow over section with cylindrical body and flap.

- A – Part of external geometry. Computational domain is flooded by values of static pressure.
- B – Part of internal geometry. Domain is flooded by values of density

По данным статического давления в нескольких точках вблизи отверстия надстройки построены спектральные функции. Результаты показали, что пульсации давления получаются низкочастотными. Для точки, расположенной в геометрическом центре отверстия, на рис. 6–8 показаны полученные в расчетах кривые. Рис. 6 соответствует случаю без заслонки, рис. 7 и 8 соответствуют случаям отклонения заслонки на 26° и 41° от горизонтали. В целом локальные максимумы спектральных функций имеются при значениях частот $34\div 39$ Гц, $44\div 47$ Гц, $163\div 168$ Гц, и $332\div 336$ Гц. Из полученных данных следует, что наличие заслонки не сказывается на частотах пульсаций давления, но влияет на амплитуду этих пульсаций. С возрастанием угла наклона заслонки растет амплитуда пульсаций.

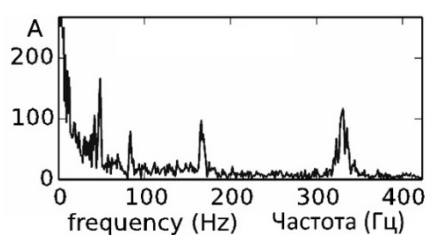


Рис. 6. Без заслонки
Fig. 6. Without flap

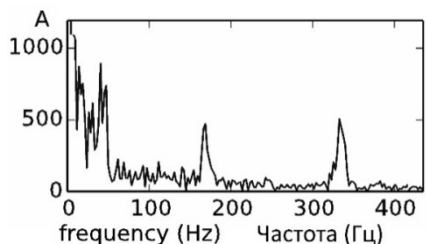


Рис. 7. С заслонкой, установленной под углом 26° к горизонтали
Fig. 7. With the flap deflected for 26°

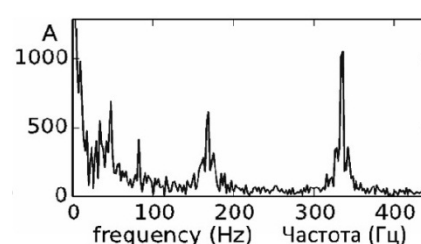


Рис. 8. С заслонкой, установленной под углом 41° к горизонтали
Fig. 8. With the flap deflected for 41°

Спектральная функция пульсаций статического давления в цилиндрическом отсеке с внутренним телом
Power spectrum of static pressure oscillations in the flow over 3D section

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено численное моделирование течений в кавернах и отсеках высокоскоростным потоком газа с использованием двух полуэмпирических моделей турбулентности. Показано, что имеющийся программный комплекс позволяет проводить моделирование нестационарных течений, как в двумерной, так и в трехмерной постановках. На основе срав-

нения с экспериментальными данными [5, 6] и частотами Росситера [12] можно заключить, что получаемые в расчетах численные результаты обладают достаточной точностью в пределах $6 \div 10$ % по дискретным тонам относительно экспериментальных данных полуэмпирической теории.

Рассмотрены две модели турбулентной вязкости. Первая из них – k - ϵ модель [1–3] с учетом сжимаемой диссипации по Sarkar [10] и неравновесности турбулентности по Chen [11]. Вторая модель – μ_t - k - ϵ модель [4] с учетом сжимаемой диссипации по Sarkar [10] и неравновесной турбулентной вязкостью. Обе модели позволяют получать близкие по частотам результаты и могут быть использованы при моделировании нестационарных течений.

В двумерном случае исследовалось влияние геометрического фактора на частоты пульсаций статического давления. В результате получилось, что увеличение высоты выступающей во внешнюю область части геометрии не сказывается на частотах колебаний. Наличие выступающей части приводит к подавлению части низкочастотных мод колебаний. В рассмотренном случае с параметрами работы [6] это 1-я и 3-я моды.

Влияние геометрического фактора в трехмерном случае оценено для цилиндрической каверны с цилиндрической надстройкой и плоскими боковыми стенками. Внутри надстройки имелась полость, соединенная с внешним течением через отверстие прямоугольного сечения. Изменение геометрии заключалось в отсутствии на кромке вблизи отверстия заслонки (первый случай) или наличии заслонки с изменяемым углом (26 и 41°) относительно горизонтали (второй и третий случаи). Заслонка отклонена внутрь отсека. Статистика накапливалась в точках вблизи отверстия. Результаты исследования показали, что наличие заслонки не изменяет частот пульсаций давления. С ростом угла отклонения заслонки растут амплитуды колебаний давления во всех рассмотренных точках течения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Глушко Г.С., Иванов И.Э., Крюков И.А.** Моделирование турбулентности в сверхзвуковых струйных течениях [Электронный ресурс] // Физико-химическая кинетика в газовой динамике: сетевой журн. 2010. Т. 9. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/142/> (дата обращения: 09.07.2016).
- 2. Глушко Г.С., Иванов И.Э., Крюков И.А.** Численное моделирование отрывных течений в соплах [Электронный ресурс] // Физико-химическая кинетика в газовой динамике: сетевой журн. 2010. Т.9. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/143/> (дата обращения: 09.07.2016).
- 3. Крюков И.А.** Расчет сверхзвуковых турбулентных течений // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16, № 2. С. 101–108.
- 4. Иванов И.Э., Крюков И.А., Ларина Е.В.** Влияние времени релаксации турбулентной вязкости на моделирование течений в соплах и струях // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2014. № 5. С. 149–159.
- 5. Hirahara H., Kawahashi M., Khan M.U., Hourigan K.** Experimental investigation of fluid dynamic instability in a transonic cavity flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, vol. 31, pp. 333–347. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2006.05.007
- 6. Afridi U.Z.** Numerical Simulation of turbulent flow Over a Cavity. Master Thesis. Department of Appl. Math., Division of Fluid Dynamic, Chalmers University of technology, Gottingen Sweden. 2012. 61 p.
- 7. Савельев А.Д.** О влиянии задней кромки каверны на интенсивность пульсаций потока // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2001. № 3. С. 79–89.
- 8. Иванов И.Э., Крюков И.А.** Квазимонотонный метод повышенного порядка точности для расчета внутренних и струйных течений невязкого газа // Математическое моделирование. 1996. Т. 8, № 6. С. 47–55.

9. Глушко Г.С., Иванов И.Э., Крюков И.А. Метод расчета турбулентных сверхзвуковых течений // Математическое моделирование. 2009. Т. 21, № 12. С. 103–121.

10. Sarkar S., Erlebacher G., Hussaini M.Y., Kreiss H.O. The analysis and modeling of dilatational terms in compressible turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, vol. 227, pp. 473–493.

11. Chen Y. S. Applications of a new wall function to turbulent flow computations AIAA. Aerospace Sciences Meeting, 24th, Reno, NV, Jan. 6–9, 1986. 11 p.

12. Rossiter J.E. Wind tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds Technical report NARC R&M №3438, Aeronautical Research Council, UK. 1964. Pp. 1–32.

13. Численное исследование течения вязкого газа в прямоугольной мелкой каверне / Е.В. Ларина, И.А. Крюков, А. Шушаков, И.Э. Иванов // Материалы X международной конференции «Неравновесные процессы в соплах и струях», Алушта, 25–31 мая 2014 г. Алушта, 2014. С. 40–43.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ларина Елена Владимировна, кандидат физико-математических наук, ассистент и научный сотрудник МАИ, larinaelenav@gmail.com.

Крюков Игорь Анатольевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИПМ РАН им. А.Ю. Ишлинского, старший научный сотрудник МАИ, kryukov@ipmnet.ru.

Иванов Игорь Эдуардович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент МГУ им. М.В. Ломоносова, старший научный сотрудник МАИ, ivanovmai@gmail.com.

NUMERICAL SIMULATION OF CAVITY FLOW AND FLOW OVER AIRCRAFT COMPARTMENT USING SEMI-EMPIRICAL TURBULENCE MODELS

Elena V. Larina¹, Igor A. Kryukov^{1,2}, Igor E. Ivanov^{1,3}

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

²A. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

ABSTRACT

The article is devoted to the validation and application of CFD code for turbulent flows. Two-dimensional unsteady flows in the cavities and compartments and three-dimensional flow in the compartment of complex geometry have been considered. Two turbulence parameter oriented models are used.

Numerical simulation of unsteady transonic flow ($M_\infty=0.74$) in a narrow channel with a cavity inside has been conducted. The dependence of the static pressure on time at fixed points in space has been obtained. The fast Fourier transform has been applied for processing data of static pressure. The difference of 6-10% between the numerical and experimental data has been obtained.

The computations of unsteady transonic cavity flow with Mach number $M_\infty=0.85$ have been performed. Low frequency oscillations of the static pressure in several fixed points in space have been obtained. Power spectrum of oscillations at the center of the cavity is compared with experimental data and Rossiter modes. An acceptable agreement between experimental and computed data has been achieved. The influence of geometrical factors on the frequency characteristics of the flow has been investigated. For this purpose two round flaps have been added to the cavity. The most low-frequency oscillation modes changed by the presence of the flaps. The first mode was gone, the second mode amplitude decreased and the third mode amplitude significantly decreased. The changes in height of protruding part of the geometry to the external flow have led to changes in pressure pulsation amplitude without changing the frequency. The spectral functions obtained while using the two considered models of turbulence have been compared for this case. It is found that the frequency values are only slightly different; the main difference is present at the amplitude of pulsations.

The effect of deflection of flat flap on the non-stationary subsonic flow parameters in a cylindrical body with an inner compartment has been investigated. The cases of deflection angles of the flap inside the compartment with values 26° and 41° above the horizontal plane, and also the case without flap have been considered. Low-frequency oscillations of the static pressure have been obtained. The presence of the flap did not change the frequency of static pressure pulsations. With the increase of the choke deflection angle, the oscillation amplitude increases at all considered points of the flow too.

Key words: numerical simulation of high-speed turbulent flows, cavity flow problem, semi-empirical turbulence models, $k-\varepsilon$ turbulence model, lag turbulence model.

REFERENCES

1. **Glushko G.S., Ivanov I.E., Kryukov I.A.** *Modelirovanie turbulentnosti v sverkhzvukovykh struinykh techeniyakh* [Turbulence modeling for supersonic jet flows]. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoi dinamike: setevoi zhurn* [Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics]. 2010, vol. 9. Available at: <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/142/> (accessed 09.07.2016). (in Russian)
2. **Glushko G.S., Ivanov I.E., Kryukov I.A.** *Chislennoe modelirovanie otryvnykh techenii v soplakh* [Numerical simulation of separated flow in nozzles]. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoi dinamike: setevoi zhurn* [Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics]. 2010, vol. 9. Available at: <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/143/> (accessed 09.07.2016). (in Russian)
3. **Kryukov I.A.** *Raschet sverkhzvukovykh turbulentnykh techenii* [A computation of turbulent supersonic flows]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta* [Bulletin of the Moscow Aviation Institute], 2009, vol. 16, № 2, pp. 101–108. (in Russian)
4. **Ivanov I.E., Kryukov I.A., Larina E.V.** *Vliyanie vremeni relaksatsii turbulentnoi vyazkosti na modelirovanie techenii v soplakh i struyakh* [Effect of the turbulent viscosity relaxation time on the modeling of nozzle and jet flows]. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid Dynamics]. 2014, vol. 49, № 5, pp. 694–702. (in Russian)
5. **Hirahara H., Kawahashi M., Khan M.U., Hourigan K.** Experimental investigation of fluid dynamic instability in a transonic cavity flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2007, vol. 31, pp. 333–347. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2006.05.007
6. **Afridi U.Z.** Numerical Simulation of turbulent flow Over a Cavity. Master Thesis. Department of Appl. Math., Division of Fluid Dynamic, Chalmers University of technology, Gottingen Sweden. 2012. 61 p.
7. **Savel'ev A.D.** *O vliyanii zadnei kromki kaverny na intensivnost' pul'satsii potoka* [Influence of the Trailing Edge of a Cavity on the Flow Fluctuation Intensity]. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid Dynamics]. 2001, vol. 36, issue 3, pp. 408–417. DOI: 10.1023/A:1019283917947 (in Russian)
8. **Ivanov I.E., Kryukov I.A.** *Kvazimonotonnyi metod povyshennogo poryadka tochnosti dlya rascheta vnutrennikh i struinykh techenii nevyazkogo gaza* [High resolution monotone method for computation internal and jet inviscid flows]. *Matematicheskoe modelirovanie* [Math modeling]. 1996, vol. 8, № 6, pp. 47–55. (in Russian)
9. **Glushko G.S., Ivanov I.E., Kryukov I.A.** *Metod rascheta turbulentnykh sverkhzvukovykh techenii* [Computational method for turbulent supersonic flows]. *Matematicheskoe modelirovanie* [Math modeling]. 2010, vol. 2, issue 4, pp. 407–422. DOI:10.1134/S2070048210040010 (in Russian)
10. **Sarkar S., Erlebacher G., Hussaini M.Y., Kreiss H.O.** The analysis and modeling of dilatational terms in compressible turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, vol. 227, pp. 473–493.
11. **Chen Y.S.** Applications of a new wall function to turbulent flow computations AIAA. Aerospace Sciences Meeting, 24th, Reno, NV, Jan. 6–9, 1986. 11 p.
12. **Rossiter J.E.** Wind tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds Technical report NARC R&M № 3438, Aeronautical Research Council, UK. 1964. Pp. 1–32.

13. Larina E.V., Kryukov I.A., Shushakov A., Ivanov I.E. *Chislennoe issledovanie techeniya vyazkogo gaza v pryamougol'noi melkoi kaverne* [Numerical simulation of viscous flow in rectangular small cavity]. *Materialy X mezhdunarodnoi konferentsii "Neravnovesnye protsessy v soplakh i struyakh"*, Alushta, 25–31 maya 2014 [Proceedings of International Conference "The non-equilibrium processes in nozzles and jets", Alushta, 25–31 May 2014]. Alushta. 2014. Pp. 40–43. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Larina Elena Vladimirovna, PhD, Teaching Assistant and research Fellow of Moscow Aviation Institute, larinaelenav@gmail.com.

Kryukov Igor' Anatol'evich, PhD, Senior research Fellow of A. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Senior research Fellow of Moscow Aviation Institute, kryukov@ipmnet.ru.

Ivanov Igor' Eduardovich, PhD, Associate Professor, Assistant Professor of Lomonosov Moscow State University, Senior research Fellow of Moscow Aviation Institute, ivanovmai@gmail.com.