

На правах рукописи



ЛАРИНА Елена Владимировна

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ
ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДВУХ И
ТРЕХПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ**

Специальность 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА – 2014

Работа выполнена на кафедре «Вычислительная математика и программирование»
ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)

Научный **Крюков Игорь Анатольевич**

руководитель: кандидат физико-математических наук, старший научный
сотрудник Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Официальные **Секундов Александр Николаевич**

оппоненты: доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
Государственного научного центра Федерального государственного
унитарного предприятия "Центральный институт авиационного
моторостроения имени П.И. Баранова",

Сафронов Александр Викторович

кандидат физико-математических наук, руководитель отдела
«Газодинамика старта» ФГУП "Центральный научно-
исследовательский институт машиностроения" (ЦНИИмаш).

Ведущая Государственный научный центр Российской Федерации
организация: федеральное государственное унитарное предприятие
«Исследовательский центр имени М.В. Келдыша»

Защита состоится «24» декабря 2014 г. в 10ч. 00 мин. на заседании диссертационного
совета Д 212.125.14 на базе Московского авиационного института (национального
исследовательского университета) по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское ш., д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский
авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Автореферат разослан «__» _____2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.125.14

к. ф.-м. н., с.н.с.



Гидаспов В. Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Большинство турбулентных сверхзвуковых и гиперзвуковых течений сопровождается такими явлениями, как ударные волны, волны разрежения, пограничные слои или слои смешения. Необходимость моделирования сверхзвуковых турбулентных течений возникает при проектировании двигательных установок летательных аппаратов (ЛА), при исследовании прохождения плотных слоев атмосферы космическими аппаратами. Поэтому для повышения точности моделирования актуальной задачей остается выбор модели турбулентности. Развивающиеся вихреразрешающие методы (LES (large-eddy simulation, или метод моделирования крупных вихрей), RANS-LES (комбинированные методы), MILES (Monotone Integrated Large Eddy Simulation) и др.), вычислительно затратны и часто не подходят для инженерных приложений, хотя позволяют получать результаты с хорошей точностью. Альтернативой остаются различные RANS модели (Reynolds-averaged Navier-Stokes, осредненные по Рейнольдсу уравнения переноса массы, импульса и энергии).

Выбор среди RANS моделей турбулентности осложняется их разнообразием. Существует класс одно- и двухпараметрических моделей турбулентности, настроенных на точное описание канонических течений. Для течений с большими градиентами параметров эти модели приводят к заметным погрешностям в средних параметрах. Наличие местных больших градиентов сказывается на параметрах течения вниз по потоку, поэтому для моделей турбулентности важен правильный учет предыстории течения, в том числе учет различных неравновесных эффектов. Это важно и при моделировании нестационарных сжимаемых течений, например, течений в кавернах. Каверны используются на поверхностях теплообменных устройств, встречаются на различных видах обтекаемых поверхностей частей ЛА.

Модели напряжений Рейнольдса предназначены для учета предыстории течения, но они не лишены эмпиризма, могут приводить к нефизичным решениям, содержат большое число уравнений и добавляют жесткость системе уравнений, что неприемлемо для инженерных задач. Другой класс моделей с дополнительным учетом предыстории течения по сравнению с двухпараметрическими моделями - трехпараметрические модели. Одна из таких моделей, так называемая "lag" модель турбулентности (иначе $k-\omega-\mu_t$ модель), применяется для моделирования

высокоскоростных течений с большими градиентами давления (Olsen, Coakley, 2001). Указанная модель включает дополнительное уравнение для турбулентной вязкости, в котором для определения временного масштаба и равновесной вязкости используется двухпараметрическая $k-\omega$ модель Wilcox (1994). Данная модель вычислительно экономична, поэтому ей и её модификациям в работе уделено основное внимание.

Цель работы. Разработать, верифицировать и применить трехпараметрические релаксационные модели турбулентной вязкости для моделирования высокоскоростных сжимаемых течений, сравнить их с другими трехпараметрическими и двухпараметрическими моделями турбулентной вязкости.

Задачи исследования. Для достижения цели были решены следующие задачи:

- Реализовать $k-\omega-\mu_t$ модель турбулентной вязкости Olsen, Coakley и разработать модификации данной модели с учетом дополнительных временных масштабов времени неравновесности, турбулентного давления и вязких эффектов.
- Разработать и реализовать трехпараметрическую $k-\varepsilon-\mu_t$ модель турбулентной вязкости на основе нескольких вариантов двухпараметрических $k-\varepsilon$ моделей турбулентности, таких как "стандартная" $k-\varepsilon$ модель Launder, Spalding (1974), $k-\varepsilon$ модель Chen (1986), RNG $k-\varepsilon$ модель Yakhot et..al. (1992).
- Исследовать применимость исходной $k-\omega-\mu_t$ модели и модифицированных моделей для расчета сверхзвуковых и гиперзвуковых двумерных течений (отрывных течений в соплах, течения в струе, обтекания сжимающего угла).
- Разработать программный комплекс расчета трехмерных турбулентных течений на неструктурированных сетках и проверить его работоспособность.
- Применить параметрические модели турбулентности для расчета высокоскоростного двумерного течения в воздухозаборнике и нестационарного течения внутри мелкой каверны и отсеке ЛА.

Методы исследования. Используется метод численного моделирования. Газ - «однокомпонентный» идеальный. Математическая модель (ММ) состоит из системы осредненных по Фавру уравнений переноса массы, импульса, энергии и турбулентных величин. Для решения уравнений ММ выбран обобщенный метод Годунова второго (для трехмерных уравнений) и более (для двумерных уравнений) порядка точности по пространству и времени, в котором решение задачи о распаде разрыва реализовано с помощью точного и различных приближенных решателей. Порядок точности по

пространству достигается применением процедуры восстановления, порядок точности по времени - использованием многошагового метода Рунге-Кутты. Среди используемых моделей турбулентности есть низкорейнольдсовые (требующие разрешения пограничного слоя вплоть до вязкого подслоя) и высокорейнольдсовые (требующие разрешения пограничного слоя до логарифмического подслоя) модели. Для последних граничные условия на твердых поверхностях ставятся на основе пристеночных функций с учетом градиента давления, предназначенных для течений с отрывами. Для нахождения стационарных решений применяется метод установления.

Достоверность результатов исследования обусловлена сравнением результатов с аналитическими решениями, экспериментальными результатами, предложенными для верификации моделей турбулентности и расчетными результатами других авторов, контролем точности вычислений.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что:

- впервые предложена модификация $k-\omega-\mu_t$ модели турбулентности с учетом сжимаемости, неравновесных эффектов и турбулентного давления, позволяющих улучшать предсказание положения системы скачков уплотнения и статического давления в недорасширенной сверхзвуковой струе по сравнению с исходной $k-\omega-\mu_t$ моделью Olsen, Coakley, предсказание положения отрыва и восстановления статического давления при перерасширенном режиме течений в плоских и осесимметричных соплах;
- впервые получена простая трехпараметрическая релаксационная $k-\varepsilon-\mu_t$ модель турбулентности и исследована ее применимость для расчетов сверхзвуковых и гиперзвуковых турбулентных двумерных течений с отрывами и течения в недорасширенной сверхзвуковой струе. Показано, что данная модель является одной из лучших RANS моделей турбулентности для указанных классов течений.

Практическая значимость исследования состоит в том, что:

- на основе полученных моделей турбулентности можно проводить моделирование двух- и трехмерных высокоскоростных течений в двигательных установках ЛА,
- показана применимость $k-\omega-\mu_t$, $k-\varepsilon-\mu_t$ моделей турбулентности и $k-\omega-\mu_t$ моделей с учетом временного масштаба неравновесности, турбулентного давления и вязких эффектов для расчета высокоскоростных сжимаемых течений,
- исследована роль геометрических факторов, таких как форма люков и

расположение отверстий в люках на режимы течения, возникающие в отсеках ЛА при обтекании их внешним дозвуковым потоком.

Представление результатов работы. Основные результаты работы докладывались на VII-X Международных конференциях по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2008, -2010, -2012, -2014), XVI-XVIII Международных конференциях по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС-2009, -2011, -2013), 4-ой и 5-ой Всероссийских школах-семинарах "Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем" (АФМ-2010, -2011), X Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (2011), IX Международном Симпозиуме по радиационной плазмодинамике (РПД-2012), XIII международной школе-семинаре «Модели и методы аэродинамики» (ММА-2013), 29-th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS-2014).

Публикации. Основные научные результаты работы опубликованы в 13 печатных работах, в том числе в 3 статьях в изданиях, определенных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций.

Личный вклад автора Автором выполнена вся работа по решению уравнений моделей турбулентности и постановке граничных условий для турбулентных величин в трехмерном коде расчета на неструктурированных сетках, модификации двумерного кода для использования трехпараметрических моделей турбулентности, анализу влияния релаксационного уравнения для турбулентной вязкости в задаче затухания однородной изотропной турбулентности. Автор принимал непосредственное участие в формулировке предлагаемых моделей турбулентности, в разработке трехмерного кода для расчета течений на неструктурированных сетках, в проведении всех вычислительных экспериментов, в том числе постановке начальных и граничных условий, соответствующих экспериментальному описанию, построению и модификации сеток, проведении расчетов и обработке их результатов, исследованиях сходимости, применимости моделей турбулентности, поиске литературы и подготовке публикаций по теме диссертационной работы.

На защиту выносятся:

1) трехпараметрическая k - ε - μ_t модель турбулентности, включающая уравнения

стандартной k - ε модели турбулентности и дополнительное релаксационное уравнение для турбулентной вязкости, позволяющая повысить точность прогноза отрыва турбулентного пограничного слоя в соплах, при обтекании сжимающего угла;

2) результаты исследования свойств моделей турбулентности, оказывающих влияние на средние параметры турбулентности в задаче о взаимодействии однородной изотропной турбулентности со стационарной ударной волной;

3) результаты численного моделирования отрывных течений с использованием предложенных трехпараметрических моделей турбулентности в соплах, недорасширенной сверхзвуковой струе, отрывного течения вблизи сжимающего угла, широко используемых для верификации различных моделей турбулентности;

4) результаты моделирования сверхзвукового двумерного течения в воздухозаборнике;

5) результаты численного исследования методов управления параметрами колебательного режима течения вязкого газа в открытой мелкой каверне с помощью геометрического фактора.

Структура работы. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников (184 наименования), содержит 140 иллюстраций. Номера рисунков и формул состоят из номера главы и текущего номера внутри главы, например, (1.13) – формула 13 из главы 1. Объем работы составляет 165 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность, сформулированы цели, задачи, методы исследования, научная и практическая значимость, структура работы.

В главе 1 содержится описание ММ, включающей трехпараметрическую k - ω - μ_t модель турбулентности и ее модификаций, и результаты численных и аналитических исследований данной модели на примере течений вдали от стенок. Рассматриваются модели турбулентности: «стандартная» k - ε модель (Launder, Spalding, 1974), Chen (1986), k - ω модель Wilcox (1994), k - ω - μ_t модель Olsen, Coakley (2001). В отдельных задачах применяются другие варианты k - ε модели (Chen, Kim (1987), Haroutunian (1995), Thakur et.al. (1996), RNG Yakhot et.al. (1992)).

Рассматриваемая k - ω - μ_t модель Olsen, Coakley дополняет k - ω модель Wilcox ещё одним уравнением для неравновесной турбулентной вязкости вида:

$$\frac{\partial \mu_t}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle \mu_t}{\partial x_i} = c_\tau \omega (\mu_{tE} - \mu_t), \quad (1)$$

где $\mu_{tE} = c_\mu \bar{\rho} k / \omega$ - равновесная турбулентная вязкость, μ_t - неравновесная турбулентная вязкость, $\langle u_i \rangle$ - компонента вектора средней скорости, x_i - координаты, t - время, $\bar{\rho}$ - средняя плотность, k - кинетическая энергия турбулентности, ω - средняя частоты турбулентных пульсаций, $c_\tau = 0.35$. Данное уравнение содержит лишь источниковый член $c_\tau \omega (\mu_{tE} - \mu_t)$ релаксационного типа и невязкий конвективный оператор. Поэтому вычислительные затраты этой и исходной двухпараметрической модели близки. Выражение для равновесной турбулентной вязкости описывает мгновенную реакцию на изменение локальных скоростей деформации, тогда как неравновесная турбулентная вязкость моделирует отставание значений напряжений Рейнольдса во времени и пространстве (предысторию течения). Источниковый член позволяет решению «настраиваться» с течением времени на локальное равновесное значение, поэтому приведенное уравнение является релаксационным, параметр $\tau = 1/\omega$ - время релаксации.

В основе модификации k - ω - μ_t модели турбулентной вязкости лежит предположение, что релаксационные процессы в турбулентных течениях имеют различную физическую природу и, следовательно, различные времена релаксации. В сверхзвуковых отрывных течениях отрыву предшествуют ударные волны, т.е. непосредственно перед отрывом располагается зона высоких градиентов параметров среднего течения и параметров турбулентности. За счет больших градиентов средней скорости появляется значительное порождение кинетической энергии турбулентности, заметно превышающее диссипацию энергии турбулентности, что можно учесть за счет дополнительного временного масштаба, связанного с отношением порождения к диссипации кинетической энергии турбулентности. Наличие больших градиентов кинетической энергии турбулентности соответствует большим градиентам "турбулентного давления" в осредненных уравнениях баланса импульса. Это можно учесть путем модификации времени релаксации в уравнении для неравновесной вязкости за счет временного масштаба, связанного с градиентом кинетической энергии турбулентности. При возникновении отрыва пограничного слоя, можно предположить, что важны вязкие эффекты. Тогда для модификации времени релаксации используем временной масштаб с учетом турбулентного числа Рейнольдса. Вариант такой модификации был предложен и в исходной k - ω - μ_t модели.

При учете неравновесности турбулентности в качестве масштаба времени целесообразно взять масштаб $P_k \tau_1 / (\bar{\rho} \varepsilon)$, характеризующий отклонение течения от равновесия, то есть

того состояния течения, в котором порождение турбулентной энергии близко к ее диссипации. Когда течение равновесное, данный масштаб должен быть равен 1, и в таком случае для описания течения достаточно интегрального временного масштаба турбулентности. Новый временной масштаб определим как линейную комбинацию базового временного масштаба из уравнения (1) и масштаба времени, характеризующего неравновесность турбулентности. В таком случае получаем релаксационное уравнение в следующей форме:

$$\frac{\partial \mu_t}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle \mu_t}{\partial x_i} = c_\tau \frac{1}{\tau_1} \max \left(c_3, \frac{\tilde{\lambda}}{(1 + c_{\tau 2} (\tilde{\lambda} - 1))} \right) (\mu_{tE} - \mu_t), \quad (2)$$

где $\tilde{\lambda} = \max(\lambda, 1)$, $\lambda = P_k / (\rho \varepsilon)$ и введено ограничение на дополнительное время релаксации $c_3 = 0.001$. В случае модификации $k-\omega-\mu_t$ модели $1/\tau_1 = \omega$, $\lambda = P_k / (\rho k \omega)$.

Масштаб времени, чувствительный к значительному перепаду кинетической энергии турбулентности, исходя из соображений размерности, есть следующая величина: $\tau_2 = \sqrt{k} / \|\nabla k\|$. С учетом данного масштаба и линейной зависимости от него времени релаксации уравнение для неравновесной вязкости становится:

$$\frac{\partial \mu_t}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle \mu_t}{\partial x_i} = c_\tau \frac{1}{\tau_1} \max \left(c_3, \left(1 + c_{\tau 2} \|\nabla k\| / \left(\frac{1}{\tau_1} \sqrt{k} \right) \right)^{-1} \right) (\mu_{tE} - \mu_t). \quad (3)$$

Другим способом влияния на время релаксации является использование турбулентного числа Рейнольдса. В пограничном слое это число становится малым, и его величина может сказаться на прогнозе точки отрыва. В таком случае релаксационное уравнение предлагается использовать в следующем виде:

$$\frac{\partial \mu_t}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle \mu_t}{\partial x_i} = c_\tau \frac{1}{\tau_1} \max \left(c_3, \left(1 + c_{\tau 2} / \sqrt{\text{Re}_t} \right)^{-1} \right) (\mu_{tE} - \mu_t). \quad (4)$$

Использованный в $k-\omega-\mu_t$ модели вариант учета предыстории течения на основе дополнительного уравнения для неравновесной турбулентной вязкости можно применить к большинству двухпараметрических моделей турбулентности. В работе на основе данного подхода построена трехпараметрическая $k-\varepsilon-\mu_t$ модель. В качестве базовой модели принимается модель из двух уравнений: уравнения для кинетической энергии турбулентности k и уравнения для скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ε , для определения времени релаксации используется турбулентный масштаб $\tau = \varepsilon/k$. Дополнительное уравнение $k-\varepsilon-\mu_t$ модели имеет вид:

$$\frac{\partial \mu_t}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle \mu_t}{\partial x_i} = c_\tau \frac{\varepsilon}{k} (\mu_{tE} - \mu_t), \quad (5)$$

где $\mu_{tE} = c_\mu f_\mu \bar{\rho} k^2 / \varepsilon$ - равновесная турбулентная вязкость.

Смысл неравновесной турбулентной вязкости показан на **задаче затухания однородной изотропной турбулентности** (с начальным условием для турбулентной вязкости $v_t(0) = v_{te0} + \Omega$). Из полученного решения: $k = k_0(1 + \lambda t)^{-n}$, $\varepsilon = \varepsilon_0(1 + \lambda t)^{-n-1}$, $v_t(t) = \Omega \cdot (1 + \lambda t)^{-c_\tau n} + v_{te}(t)$, где $n = (c_{\varepsilon 2} - 1)^{-1}$, $\lambda = \varepsilon_0 / (nk_0)$, $\alpha = p / c_\tau n$, $p = 1 - n \cdot (1 - c_\tau)$, видно, что к значению равновесной турбулентной вязкости добавляется дополнительный член, равный $\Omega \cdot (1 + \lambda t)^{-c_\tau n}$. Если $\Omega = 0$, то релаксационное уравнение не влияет на решение. При наличии в значении неравновесной вязкости начального возмущения $\Omega = const \neq 0$, решение асимптотически стремится к равновесному значению $v_{te}(t)$ и через некоторое время незначительно отличается от равновесного значения.

Исследована **задача о взаимодействии однородной изотропной турбулентности с ударной волной**. Турбулентный поток, движущийся слева направо, взаимодействует со стационарной ударной волной, находящейся в плоскости $x=2$ (или $x=3$). Параметры исследуемого течения взяты из работы Sinha et.al. (2003). Турбулентное число Маха $M_t=0.14$, число Рейнольдса на основе микромасштаба Тейлора $Re_\lambda=19.1$. Энергия турбулентности k на приведенных далее рисунках обезразмерена значением кинетической энергии турбулентности непосредственно перед ударной волной (k_1), а по оси абсцисс откладывается координата вдоль по потоку, обезразмеренная на масштаб длины.

В данной работе, как и в Sinha et.al. (2003), Veera, Sinha (2009), не удалось воспроизвести резкий рост k на фронте ударной волны с последующим резким падением (практически до уровня перед ударной волной) и уже после этого выход на затухание турбулентности в равномерном потоке.

Сравнение двухпараметрических (и соответствующих трехпараметрических) k - ε , k - ω моделей турбулентности показало, что среди рассмотренных моделей модели Chen (1986), Chen, Kim (1987), Naroutunian (1995) дают наилучшее совпадение с результатами DNS (прямого численного моделирования), особенно по скорости затухания турбулентности за ударной волной (рис. 1). Модель Chen (1986) в случаях $M_1=1.29$ и $M_1=1.5$ приводит к завышенному уровню k даже по сравнению со стандартной моделью, но темп затухания хорошо согласуется с наблюдаемым в DNS.

Другой параметр моделей, влияющий на результат взаимодействия - ограничитель на отношение порождения к диссипации кинетической энергии турбулентности $P_k / \bar{\rho}\epsilon_s < P_{\max}$. Он влияет на рост и затухание энергии турбулентности k за ударной волной (рис. 2). С уменьшением этого параметра уменьшается скачок k на ударной волне, что легко предсказуемо из смысла рассматриваемого ограничения. Константа P_{\max} должна быть близка к теоретическому значению ($P_{\max} \in [10;15]$, Gerolymos, 1990).

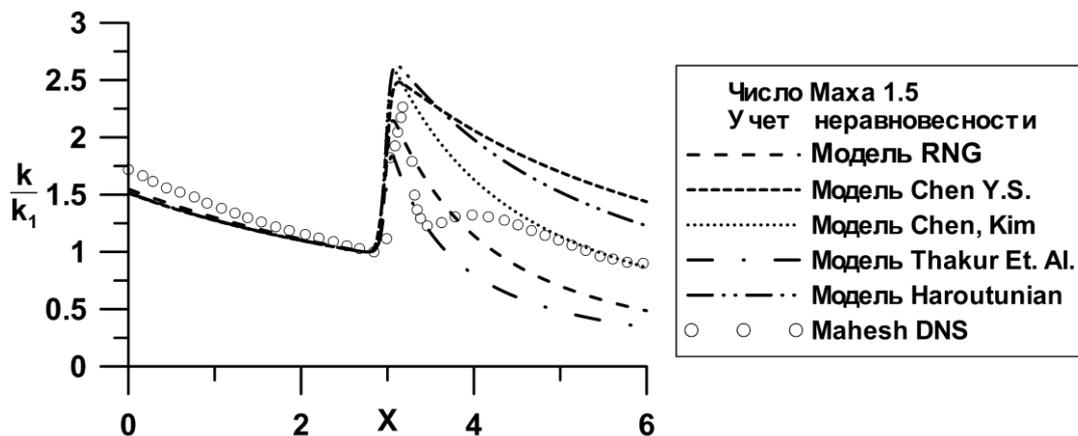


Рис. 1. Распределение кинетической энергии турбулентности при $M_1=1.5$. Сравнение различных моделей учета неравновесности в k - ϵ модели.

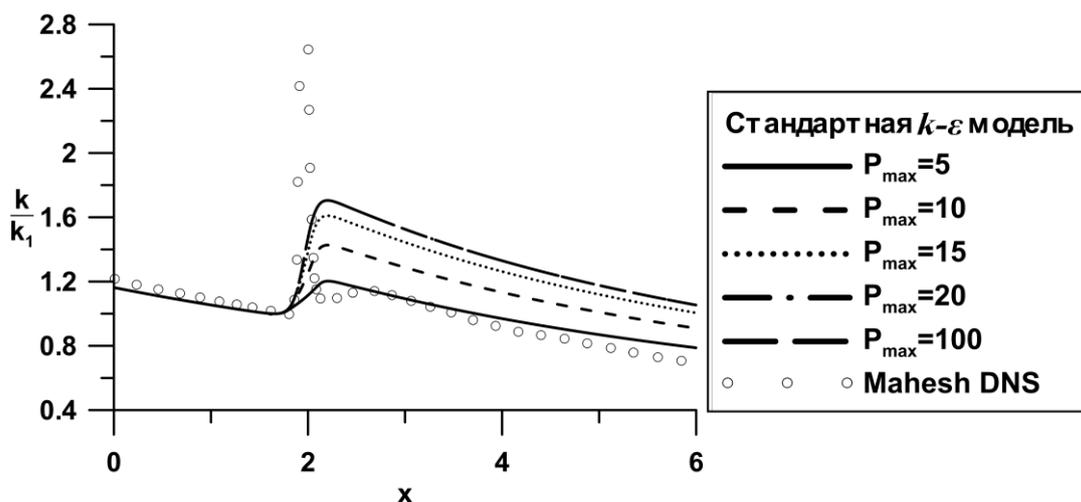


Рис. 2. Распределение кинетической энергии турбулентности при $M_1=1.29$. Влияние постоянной P_{\max} в ограничителе $P_k / \bar{\rho}\epsilon_s < P_{\max}$.

Моделирование течения в недорасширенной сверхзвуковой струе.

Проблемами моделирования турбулентных струй занимаются целые коллективы исследователей. В развитие теории и методов расчета и измерения турбулентных струйных течений большой вклад внесли Абрамович Г.Н., Секундов А.Н., Сафронов А.В., Молчанов А.М., Любимов, Запрягаев В.И., Панасенко А.В., Шур М.Л., Стрелец М.Х. Тем не менее, сверхзвуковая струя по-прежнему остается хорошим тестом для моделей турбулентности. Предлагаемые в работе модификации k - ω - μ_t модели с дополнительными временами

релаксации предназначены для расчета отрывных пристеночных течений, но могут быть использованы и для течений без стенок, где ударные волны взаимодействуют со сдвиговыми слоями, в некотором смысле аналогичными сдвиговому течению вблизи стенок. Параметры рассматриваемого двумерного течения в сверхзвуковой недорасширенной турбулентной струе воздуха, экспериментально исследованной Seiner, Norum (1979), следующие: нерасчетность $n=P_0/P_a=1.45$ (P_0 – давление на срезе сопла, P_a – давление в окружающей среде), на срезе сопла число Маха $M=2$, температура 163^0K .

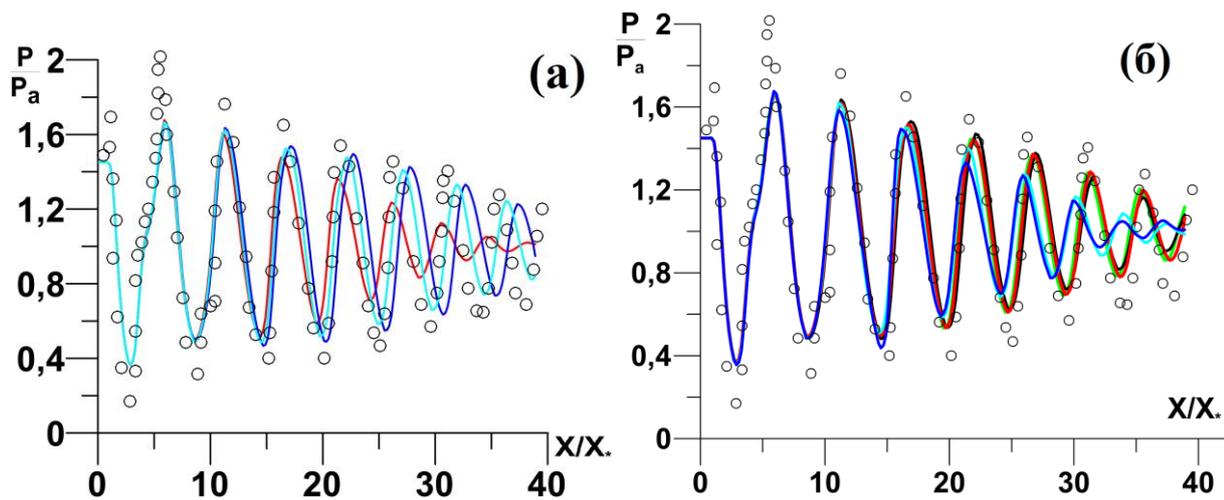


Рис. 3. Статическое давление вдоль оси струи. Символы - эксперимент Seiner, Norum; кривые - расчеты: а) голубая - $k-\epsilon-\mu_t$ модель (5), красная - $k-\epsilon$ модель Launder, Spalding, синяя - $k-\epsilon$ модель Chen; б) синяя - $k-\omega$ модель Wilcox, голубая – $k-\omega-\mu_t$ модель Olsen, Coakley, черная – $k-\omega-\mu_t$ модель (2), $C_{t2}=5$, зеленая - $k-\omega-\mu_t$ модель (3), $C_{t2}=1$, красная - $k-\omega-\mu_t$ модель (4), $C_{t2}=3$. X_* – радиус выходного сечения сопла.

Для рассматриваемой струи характерно наличие сложной ударно-волновой структуры, приводящей к значительным изменениям в значениях статического давления на оси струи. На рис. 3 представлено статическое давление в струе, полученное с использованием двух- и трехпараметрических моделей. Две первые бочки воспроизводятся всеми моделями одинаково. Видно, что и «стандартная» $k-\epsilon$ модель и $k-\omega$ модель Wilcox, не позволяют достаточно точно рассчитать дальние бочки струи. Добавление к модели релаксационного уравнения улучшает ситуацию по предсказанию статического давления в дальних бочках, что справедливо и для $k-\omega-\mu_t$ модели Olsen, Coakley, и для $k-\epsilon-\mu_t$ модели (5). Учет зависимостей времени релаксации от дополнительных временных масштабов (2), (3), (4) позволяет улучшить предсказание максимумов и минимумов статического давления по сравнению с моделью Olsen, Coakley, при этом прирост амплитуды сопровождается смещением пиков статического давления ближе к экспериментальным значениям.

В главе 2 представлено описание программного комплекса расчета пространственных турбулентных течений на неструктурированных сетках, численный метод, и приведены

результаты тестирования. С использованием разработанного программного комплекса проведено моделирование течения внутри модели ГПВРД, экспериментально исследованной в аэродинамической ударной трубе ГУАТ ИПМех РАН (Котов М.А., Рулева Л.Б., Солодовников С.И., Суржиков С.Т., 2012). Сравнение экспериментальной шпирен-фотографии с результатами численного моделирования показало соответствие зон высоких градиентов плотности.

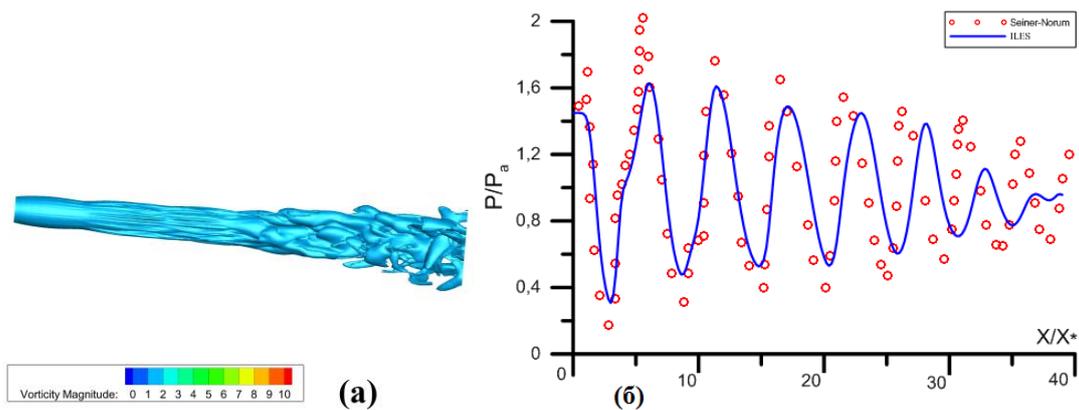


Рис.4. Изоповерхности модуля завихренности в струе (а) и распределение среднего давления вдоль оси струи (б), обозначения соответствуют рис. 3.

С использованием LES подхода на основе разработанного программного комплекса проведено моделирование недорасширенной сверхзвуковой турбулентной струи Seiner, Norum. В данном расчете не задавалась искусственная «турбулизация» течения на входе, поэтому развитие турбулентности начинается примерно со второй бочки струи, что хорошо видно по мгновенному полю завихренности (рис. 4а). Сравнение полученных на основе LES подхода результатов с экспериментальными данными дано на рис. 4(б). Точки соответствуют экспериментальным данным, сплошная линия – результаты расчета. Видно, что разработанный код дает вполне приемлемые результаты по среднему давлению. Точность полученных результатов заметно выше результатов по «стандартной» $k-\varepsilon$ модели (рис. 3а) и сравнима с точностью большинства более «продвинутых» RANS моделей из главы 1.

В главе 3 представлены результаты численного моделирования отрывных течений в соплах для случаев плоского и осесимметричных профилированного и конических сопел. Течения в соплах исследовались в огромном количестве работ, в том числе и в работах известных ученых, таких как, Абрамович Г. Н., Пирумов У.Г., Стернин Л.Е., Глушко Г.С., Шустов С.А., Крайко А.Н. и других. В данной работе течения в сверхзвуковых соплах в перерасширенном режиме используются как сложные течения, пригодные для тестирования моделей турбулентности.

Проведено численное моделирование стационарного двумерного отрывного турбулентного течения воздуха внутри плоского сопла и сравнение с экспериментальными результатами Hunter С.А. (1998). Для выбора диапазона постоянных релаксационных моделей рассматривался случай $n=2.4$ (n – отношение статического давления на входе в сопло к давлению в окружающем пространстве). В результате в уравнении (2) $C_{\tau 2} \in [1; 10]$ при нулевой сжимаемой диссипации и $C_{\tau 2} \in [1; 1.5]$ при использовании сжимаемой диссипации Sarkar et.al. (1991), в уравнении (3) с использованием сжимаемой диссипации Sarkar et.al. $C_{\tau 2} \in [1; 2.5]$, в модели (4) со сжимаемостью Sarkar et.al. $C_{\tau 2} \in [1; 30]$, в k - ε - μ_t модели (5) без учета сжимаемости параметр $C_{\tau} = 0.75$. При выбранных значениях постоянных модели (2-5) улучшают предсказание положения отрыва внутри плоского сопла по сравнению с другими двухпараметрическими моделями турбулентности.

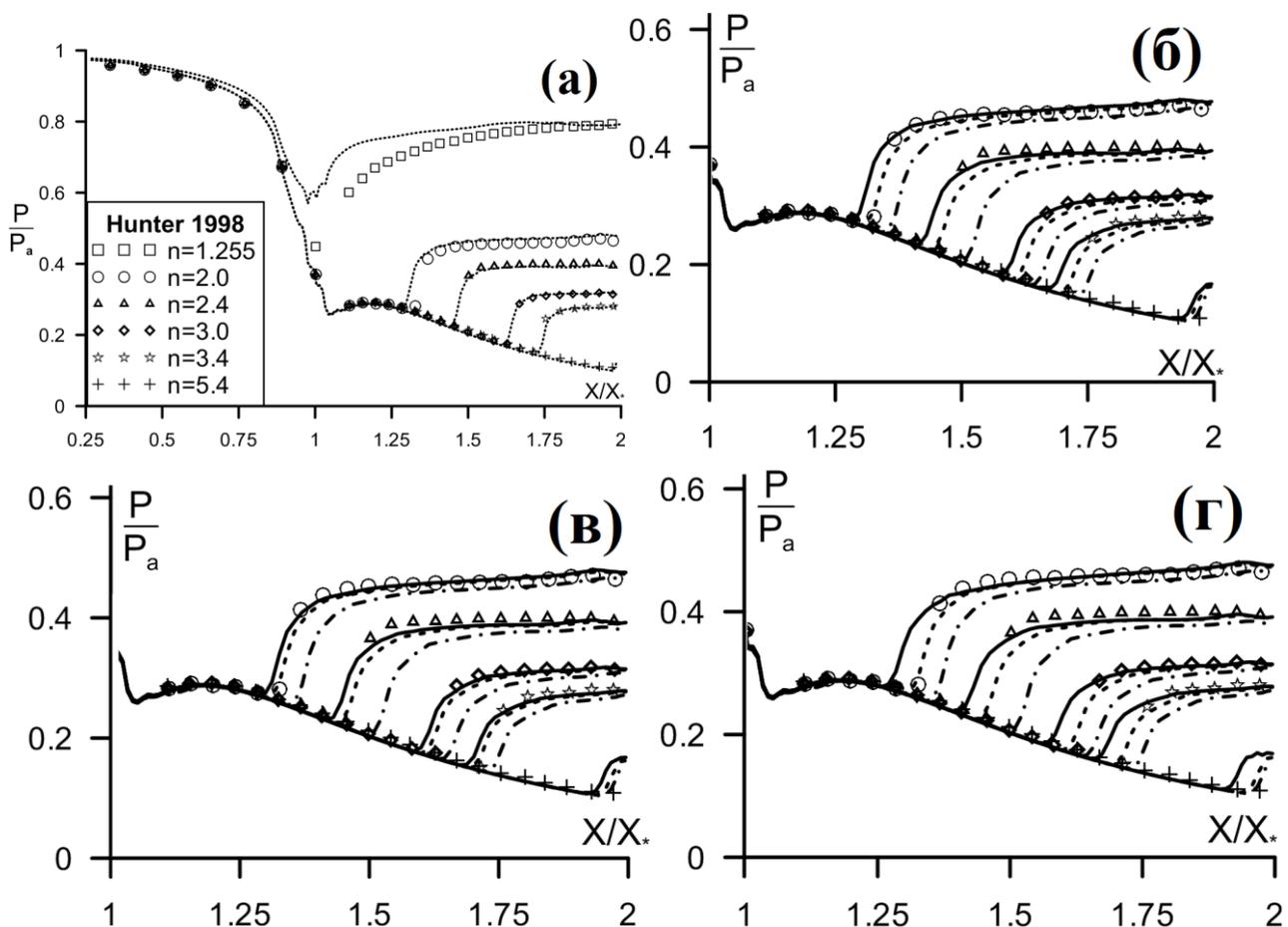


Рис. 5. Статическое давление вдоль стенки сопла. Символы - эксперимент Hunter, кривые - расчеты: штрих - k - ω - μ_t модель Olsen, Coakley, штрих-пунктир - k - ω модель Wilcox (1994), сплошная линия - а) k - ε - μ_t модель (5), б) k - ω - μ_t модель (2), $C_{\tau 2}=5$; в) k - ω - μ_t модель (3), $C_{\tau 2}=1.5$; г) k - ω - μ_t модель (4), $C_{\tau 2}=30$.

Предложенные варианты k - ω - μ_t моделей, k - ε - μ_t модель применены к течению внутри плоского сопла при $n=2.0, 2.4, 3.0, 3.4, 5.4$ (рис.5). Сравнение результатов проведенного

моделирования с экспериментом показывает, что полученные модели улучшают предсказание точки отрыва по сравнению с $k-\omega$ моделью Wilcox, а рассматриваемая $k-\varepsilon-\mu_t$ модель улучшает или не ухудшает предсказание положения отрыва по сравнению со всеми рассмотренными моделями турбулентности.

Полученные модели применялись для моделирования течений в осесимметричных соплах. На Европейской конференции по аэрокосмическим наукам (EUCASS-2007) для тестирования моделей турбулентности предложено течение воздуха внутри сопла (Stark, Hagemann). Особенностью этого варианта является большая относительная толщина стенки сопла. На торце сопла и вблизи кромки формируется вихри, искривляющие линии тока затекающего в область отрыва газа, что существенно сказывается на восстановлении давления за отрывом и положении точки отрыва. Сопло профилировано на значение $M=5.15$. В окружающем пространстве задавались нормальные условия. На входе в сопло давление 25.25 атм., температура 283К.

Предложенная $k-\varepsilon-\mu_t$ модель и $k-\omega-\mu_t$ модель Olsen, Coakley без учета сжимаемости позволяют вполне удовлетворительно получить положение отрыва (рис. б) и ударно-волновую конфигурацию. Причем $k-\varepsilon-\mu_t$ модель слишком резко восстанавливает давление за отрывом по сравнению с $k-\omega-\mu_t$ моделью. Учет сжимаемости по Sarkar et.al. (1991) для всех рассмотренных моделей приводил к более раннему отрыву, причем расхождение с опытом более значительное, чем в случае плоского сопла. По сравнению с экспериментом положение диска Маха достаточно точно предсказано с $k-\omega-\mu_t$ моделью, но его длина существенно меньше, диск Маха, предсказанный с $k-\varepsilon-\mu_t$ моделью, возникает выше по потоку, но длина предсказана точнее.

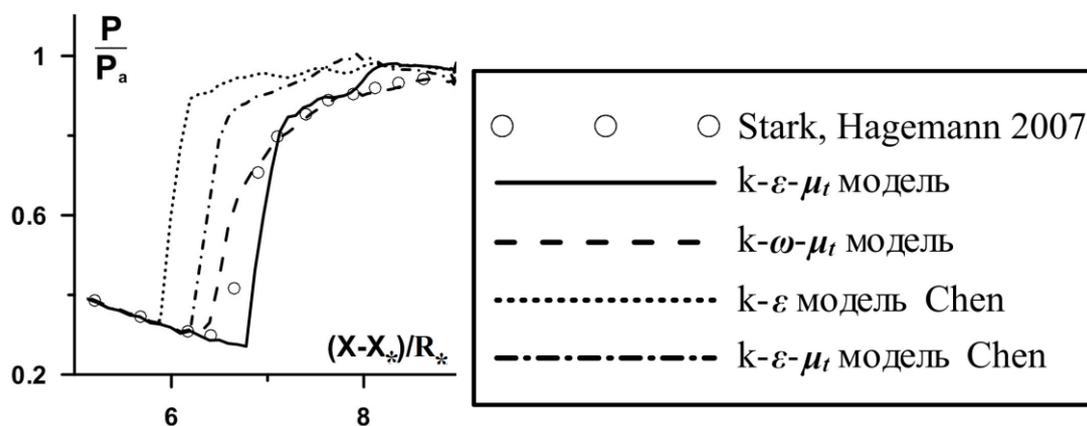


Рис. 6. Распределение статического давления вдоль стенки сопла. Кривые - расчеты, символы – эксперимент Stark, Hagemann (2007). R^* - радиус, X^* - координата критического сечения сопла

В текущей работе проведено численное моделирование течений воздуха в осесимметричных соплах, параметры и экспериментальные данные для которых приведены в

работе Малик, Тагиров, 1988. Рассматривались конические сопла с углами раствора 4° и 22.5° , и профилированное сопло при различных отношениях давлений на входе и выходе. Сравнение результатов численного моделирования по значению статического давления для всех рассмотренных случаев показывало, что $k-\varepsilon-\mu_t$ модель (5) и $k-\varepsilon$ модель Chen с учетом сжимаемости Sarkar et.al. лучше других рассмотренных моделей предсказывают положение отрыва. В результате исследований получено, что во всех случаях $k-\omega-\mu_t$ модель Olsen, Coakley приводит к более раннему положению отрыва по сравнению с базовой $k-\omega$ моделью Wilcox, а учет времени релаксации по моделям (2), (3), (4) приводит к улучшению результатов, но с использованными в эксперименте с плоским соплом малыми значениями параметра C_{t2} улучшение оказывается незначительным и требуется увеличение C_{t2} .

В главе 4 рассматриваются численное моделирование сверхзвуковых и гиперзвуковых течений вблизи сжимающих углов и в воздухозаборниках. Рассматриваемые задачи относятся к задачам о взаимодействии пограничного слоя с ударными волнами. Теория таких взаимодействий достаточно разработана благодаря трудам таких ученых, как Черный Г.Г., Нейланд В.Я., Липатов И.И., Боголепов В.В., Желтоводов А.А. и других Тем не менее, указанная задача продолжает привлекать внимание в силу неточностей большинства вычислительных моделей.

Моделировалось **сверхзвуковое течение вблизи сжимающего угла** (эксперимент Settles et.al. (1979)) для значения угла наклонной поверхности: 16° , 20° , 24° при $M=2.85$. В случае полностью присоединенного течения все модели турбулентности дают хорошее совпадение с экспериментальными данными по уровню статического давления на пластине, скорости восстановления давления и значению восстановленного давления. В течении вблизи угла 20° наиболее точные результаты и по положению отрыва, и по наклону распределения давления до его полного восстановления дают RNG $k-\varepsilon$ Yakhot et.al. и $k-\varepsilon$ модели Chen, Kim. Иллюстрация случая развитого отрывного течения с углом 24° приведен на рис. 7. Видно, что $k-\varepsilon$ модель Chen с учетом сжимаемой диссипации Sarkar et.al. (1991) и $k-\varepsilon-\mu_t$ модель без учета сжимаемой диссипации позволяют получать хорошее совпадение по длине отрывной зоны и уровню давления за отрывом. Проведенные исследования показывают, что данные модели являются лучшими для данного случая.

Моделировалось **гиперзвуковое течение вблизи сжимающего угла** (эксперимент Coleman, Stollery (1972), углы 15° , 30° , 34° , 38°) при $M=9.22$. Безотрывное течение большинство рассмотренных моделей турбулентности описывают достаточно точно. В ходе исследований получено, что в случае угла 38° $k-\omega$ модель Wilcox со сжимаемой диссипацией Dash et.al. (1993) и $k-\varepsilon$ модель Herrero et.al. (1991) со сжимаемой диссипацией Sarkar et.al.

согласуются с экспериментом по величине и положению скачка давления, но длина отрывной области довольно значительно завышена. При использовании высокорейнольдсовых моделей возникла необходимость адаптации сетки в окрестности отрыва (дополнительное сгущение вблизи точки присоединения по нормали к стенке). На рис. 8 представлено статическое давление, рассчитанное по высокорейнольдсовым моделям турбулентности. Видно, что $k-\varepsilon-\mu_t$ модель достаточно точно предсказывает значение давления в отрывном пузыре, приводит к более раннему отрыву и более позднему скачку давления, в то время как $k-\varepsilon$ модель Chen, напротив, приводит к позднему отрыву и занижает значение скачка давления. По сравнению со «стандартной» $k-\varepsilon$ моделью предложенная $k-\varepsilon-\mu_t$ модель значительно лучше предсказывает точку отрыва потока от стенки, и восстановление давления за отрывом.

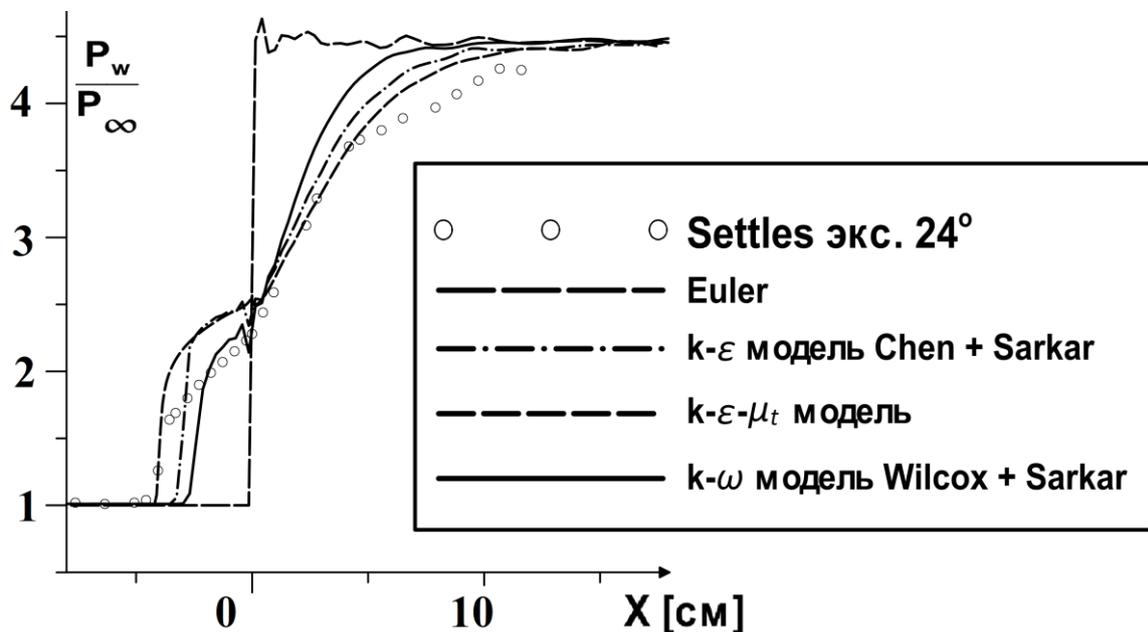


Рис. 7. Распределение статического давления вдоль стенки, сжимающий угол 24° .

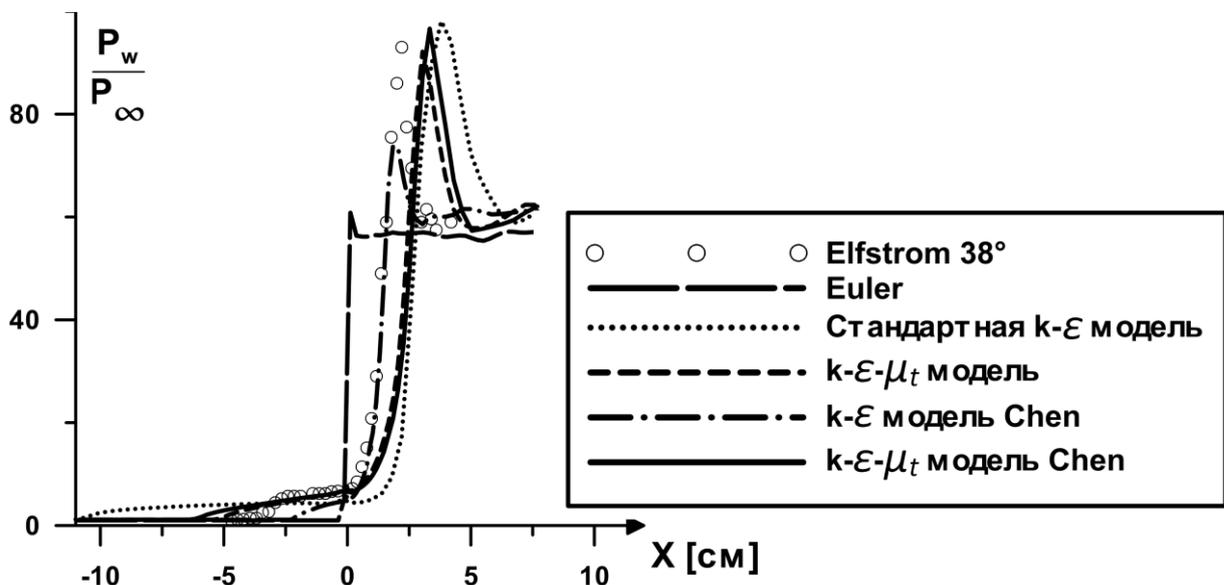


Рис. 8. Статическое давление вдоль стенки 38°, высокорейнольдсовы модели.

Трехпараметрические $k-\omega-\mu_t$ и $k-\varepsilon-\mu_t$ модели были применены для **моделирования сверхзвукового течения воздуха в воздухозаборнике** (эксперимент Herrmann, Koschel, 2002) при $M=2.5$. Сравнение шпирен-фотографии с результатами численного моделирования показывает (рис. 9), что картина течения воспроизведена с хорошей точностью и не происходит расхождения по положению отраженных скачков на протяжении всего течения в канале. Сравнение производится по $k-\omega-\mu_t$ модели, но и аналогичное сопоставление результатов по $k-\varepsilon-\mu_t$ модели показывает, что картина течения не уступает результатам по $k-\omega-\mu_t$ модели.

Статическое давление на верхней (рис. 10 а) и нижней (рис. 10 б) поверхностях воздухозаборника указывает на количественное соответствие экспериментальным данным в пределах погрешности как для $k-\varepsilon-\mu_t$, так и для $k-\omega-\mu_t$ моделей.

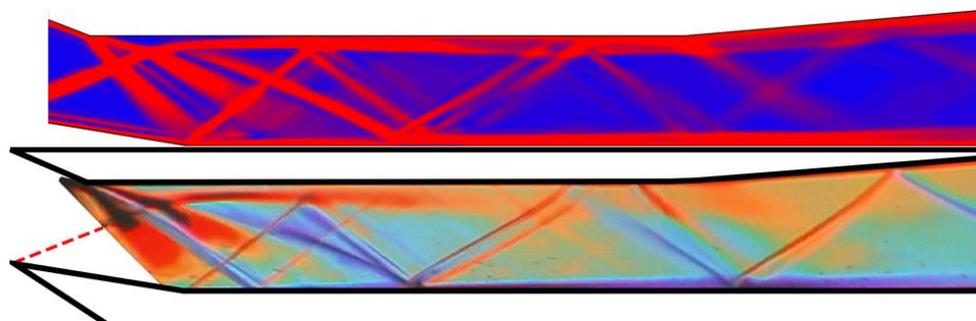


Рис. 9. Цветная шпирен-фотография внутри воздухозаборника (внизу) и поле модуля градиента плотности в расчете с использованием $k-\omega-\mu_t$ модели (вверху).

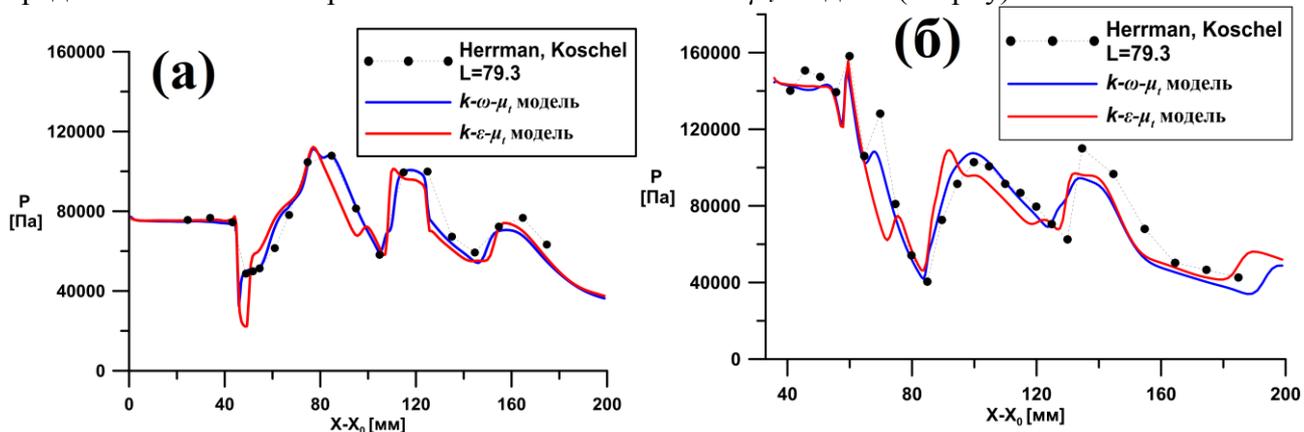


Рис. 10. Распределение статического давления а) по верхней поверхности; б) по нижней поверхности воздухозаборника. Красная линия - $k-\varepsilon-\mu_t$, синяя - $k-\omega-\mu_t$ модель.

В главе 5 содержатся результаты проведенного численного моделирования нестационарного течения внутри мелкой каверны и отсеке ЛА. В настоящее время течениями в кавернах занимаются огромное количество ученых, например, М. А. Антонов, А. Д. Савельев, И. А. Граур, Л. В. Косарев, Б. Н. Четверушкин, А.И., Гувернюк С.В., Зубков А.Ф., Симоненко М.М., Швец А.И., Миронов Д.С., Лебига В.А., Зиновьев В.Н., Пак А.Ю., N.J. Lawson, U.Z. Afridi, Schmid S., Lutz T., Kramer E и многие другие. В настоящей работе

проведено моделирование течения в прямоугольной каверне (с «открытым» типом течения и каверны с крышками) с использованием двумерного и трехмерного программных комплексов расчета турбулентных течений. В качестве одного из тестовых взято течение в каверне с $M=0.85$ (Afridi, 2012, размеры: длина $L=0.508$ м, глубина $D=0.1016$ м, ширина $W=0.101608$ м). На рис. 12 красные сплошные линии соответствуют первым четырем модам по теории Rossiter J.E. (1964), рассчитанным для данной задачи, кривая – полученный расчетный спектр. Видно достаточно хорошее (в пределах 10%) совпадение расчетных первых четырех дискретных тонов с модами Rossiter.

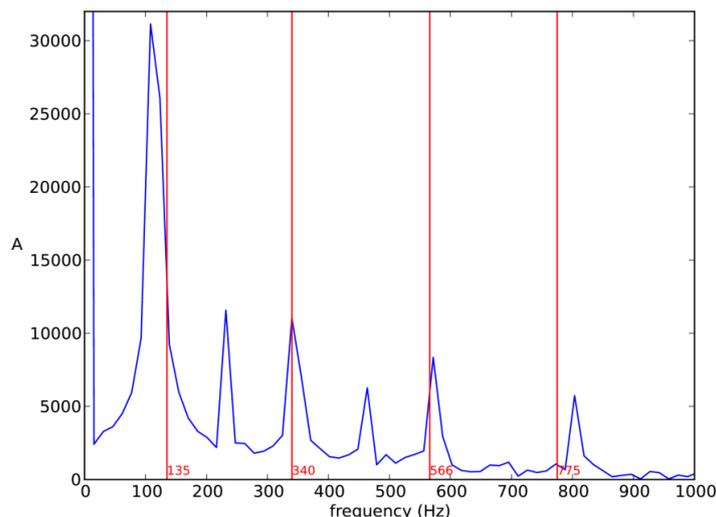


Рис. 12. Спектр пульсаций давления у передней кромки прямоугольной каверны.

Для актуальной задачи определения пульсаций давления в отсеке ЛА проведено моделирование обтекания каверны с плоским люком и разными значениями размера отверстия в люке H ($2*D$, $3*D$, $4*D$), с люком в виде дуги окружности с двумя положениями отверстия. Результаты расчетов показывают, что с помощью изменения геометрии люка можно смещать резонансные частоты в требуемую сторону.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрена $k-\omega-\mu_t$ модель турбулентности. Предложено учитывать зависимость времени релаксации в уравнении для неравновесной турбулентной вязкости от характерных масштабов времени неравновесности турбулентности, градиента турбулентного давления и вязких эффектов. Предложен возможный вид зависимости времени релаксации от перечисленных масштабов времени.
2. Разработана трехпараметрическая $k-\varepsilon-\mu_t$ модель турбулентности.
3. Исследовано поведение неравновесной турбулентной вязкости в случае затухания однородной изотропной турбулентности. Показано, что неравновесная турбулентная вязкость монотонно стремится к равновесной при любом начальном отклонении.

4. Исследовано взаимодействие затухающей турбулентности с ударной волной. по различным вариантам k - ε модели, k - ω модели и трехпараметрическим моделям турбулентности. Показано: а) рассмотренные модели не способны правильно предсказать резкое возрастание и падение турбулентности вблизи ударной волны, б) на правильное предсказание поведения кинетической энергии турбулентности на некотором расстоянии от ударной волны оказывается влияние учета неравновесности в модели турбулентности; лучше всего проявляют себя модели Chen (1986), Chen, Kim (1987) и Haroutunian, в) для правильного предсказания поведения энергии турбулентности при помощи стандартной k - ε модели турбулентности и предложенной k - ε - μ_t моделью надо использовать условие реализуемости напряжений Рейнольдса. Значение константы в этом условии должно быть близко к теоретическому.
5. Рассмотрена сверхзвуковая недорасширенная турбулентная струя. Предложенные модификации k - ω - μ_t модели позволяют управлять положением системы скачков уплотнения в рассмотренной струе по сравнению с исходной k - ω - μ_t моделью.
6. Предложенная k - ε - μ_t модель позволяет заметно улучшить точность предсказания характеристик смещения в струе и положения системы скачков уплотнения.
7. Разработан программный комплекс расчета пространственных турбулентных течений на неструктурированных расчетных сетках.
8. Показана работоспособность разработанного программного комплекса при расчете высокоскоростных течений на различных неструктурированных расчетных сетках.
9. Выполнено сравнение рассчитанных полей плотности с экспериментальными результатами по гиперзвуковому обтеканию модели тракта ГПВРД. Показано, что удастся хорошо воспроизвести структуру течения внутри этой модели.
10. Проведено численное моделирование на основе LES подхода течения в недорасширенной сверхзвуковой струе. Получено хорошее соответствие между экспериментальными данными и результатами численных расчетов.
11. Проведено моделирование отрывного течения внутри плоского сопла для предложенных k - ω - μ_t моделей (2-4). Показано, что полученные модели улучшают предсказание точки отрыва по сравнению с k - ω моделью Wilcox (1994).
12. Проведено моделирование отрывного течения внутри плоского сопла по предложенной k - ε - μ_t модели (5). Показано, что рассматриваемая k - ε - μ_t модель

улучшает или не ухудшает предсказание положения отрыва по сравнению со всеми рассмотренными моделями турбулентности.

13. Проведено численное моделирование течения внутри осесимметричного сопла с толстой стенкой. Показано, что использование $k-\varepsilon-\mu_t$ модели и $k-\omega-\mu_t$ модели позволяет получить положение отрыва, близкое к экспериментальному.

14. Рассмотрено течение внутри сверхзвуковых осесимметричных сопел с тонкой стенкой. Показано, что а) предложенные трехпараметрические модели позволяют улучшать предсказание положение отрыва по сравнению с базовой двухпараметрической моделью и по сравнению с моделями без учета сжимаемой диссипации; б) коэффициенты предложенных вариантов $k-\omega-\mu_t$ моделей (2-4), выбранные на основе результатов моделирования течения внутри плоского сопла, оказались непригодны для течений в осесимметричных соплах; в) предложенная $k-\varepsilon-\mu_t$ модель (5) не нуждается в дополнительных корректировках.

15. Рассмотрена задача моделирования сверхзвукового и гиперзвукового обтекания сжимающего угла. Показано, что с использованием рассмотренных двух- и трехпараметрических моделей можно получить приемлемое соответствие между экспериментом и расчетом по длине отрывной зоны и значению восстановленного статического давления. Получено, что наиболее удачными являются высокорейнольдсовы модели: $k-\varepsilon$ модель Chen (1986) с учетом сжимаемой диссипации Sarkar et.al. (1991) и $k-\varepsilon-\mu_t$ модель без учета сжимаемой диссипации.

16. Рассмотрена задача моделирования сверхзвукового течения в воздухозаборнике. Показано, что с использованием выбранных трехпараметрических моделей можно получить приемлемое соответствие эксперименту.

17. Проведено моделирование обтекания трансзвуковым потоком воздуха каверн разной геометрии. Установлены уровни пульсаций давления в характерных точках внутри каверны.

Автор выражает признательность Иванову Игорю Эдуардовичу за сотрудничество в ходе выполнения работы.

Публикации по теме диссертации

1) Иванов И.Э., Крюков И.А., Ларина Е.В. Влияние времени релаксации турбулентной вязкости на моделирование течений в соплах и струях // Изв. РАН. МЖГ. 2014. № 5. С. 149-159. (ВАК)

- 2) Иванов И.Э., Крюков И.А., Ларина Е.В. Математическое моделирование взаимодействия турбулентности с ударными волнами. Вестник МАИ, т. 18, №1, 2011, с. 21-26. **(ВАК)**
- 3) Крюков И.А., Глушко Г.С., Ларина Е.В. Некоторые особенности моделирования турбулентности в высокоскоростных течениях. Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского, № 4, часть 3, Нижний Новгород, 2011 г., с. 902-903. **(ВАК)**
- 4) И.Э. Иванов, И.А. Крюков, Ларина Е.В. Моделирование турбулентности при взаимодействии ударных волн с пограничными слоями в гиперзвуковых течениях: IX Международный Симпозиум по радиационной плазмодинамике: Сборник научных трудов, М.:НИЦ "Инженер", 2012, с. 56-61, ISBN 978-5-7013-0144-1.
- 5) Иванов И.Э., Крюков И.А., Ларина Е.В. Влияние учета неравновесности турбулентности на численное моделирование взаимодействия турбулентности с ударными волнами: 4-я Всероссийская школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем». Сборник научных трудов, Москва, 2011г., с. 59-62.
- 6) E.V. Larina, I.A. Kryukov, I.E. Ivanov. Numerical simulation of high-speed separation flow in the aerospace propulsion systems.ICAS 2014 Proceedings (29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences), 2014г, ISBN: 3-932182-80-4.
- 7) Ларина Е.В., Крюков И.А., Шушаков А.,Иванов И.Э.Численное исследование течения вязкого газа в прямоугольной мелкой каверне: Материалы X международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2014). Алушта, 2014 г., с. 40-43.
- 8) Иванов И.Э., Крюков И.А., Ларина Е.В. «Численное моделирование отрывных сверхзвуковых и гиперзвуковых течений вблизи сжимающего угла: Материалы XVIII международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2013). Алушта, 2013 г., с. 598-600.
- 9) Иванов И.Э., Крюков И.А., Ларина Е.В. Исследование моделей турбулентности для численного моделирования сверхзвукового и гиперзвукового отрывного обтекания сжимающего угла: Материалы XIII школы-семинара "Модели и методы аэродинамики» (ММА'2013). Евпатория, 2013 г., с. 123-125.
- 10) Иванов И.Э., Крюков И.А., Ларина Е.В. Численное моделирование высокоскоростных течений на основе трехпараметрической модели турбулентности: Материалы IX международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2012). Алушта, 2012 г., с. 43-45.
- 11) Крюков И.А., Ларина Е.В., Иванов И.Э. Численное моделирование турбулентных течений в соплах и струях на основе трехпараметрической модели турбулентности: Материалы XVII международной конференции ВМСППС'2011, Алушта, 2011 г., с. 565-567.
- 12) Иванов И.Э., Крюков И.А., Ларина Е.В. Исследование взаимодействия турбулентности с ударными волнами на основе двухпараметрических моделей: Материалы VIII

Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2010), 2010, с. 48-49.

13) Иванов И.Э., Крюков И.А., Ларина Е.В. Численное моделирование вязких пространственных течений: Материалы XVI международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСПЭС'2009). Алушта, 2009 г., с. 339-342.