



Федеральное космическое агентство  
Государственный научный центр  
Российской Федерации –  
федеральное государственное унитарное  
предприятие  
"Исследовательский центр  
имени М. В. Келдыша"  
(ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»)

ул. Онежская, д. 8, г. Москва, Россия, 125438  
Тел.: (495) 456 46 08 Факс: (495) 456 82 28  
[kerc@elnet.msk.ru](mailto:kerc@elnet.msk.ru) [kerc@comcor.ru](mailto:kerc@comcor.ru)  
[www.kerc.msk.ru](http://www.kerc.msk.ru)

10.12.2014 № 6-06/504

На № \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального  
директора по науке  
д.т.н., профессор

А.М. Губертов

2014 г.



**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ  
на диссертацию Лариной Елены Владимировны  
«Численное моделирование высокоскоростных турбулентных течений на основе  
двух и трехпараметрических моделей турбулентности»,  
представленную на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»**

**Актуальность темы диссертации**

Численное моделирование турбулентных течений является в настоящее время неотъемлемой частью работы по созданию новых объектов аэрокосмической техники. В последние годы на этом участке вычислительной газодинамики достигнут значительный прогресс благодаря широкому использованию различных моделей турбулентности. Однако выяснилось, что различия в используемых моделях турбулентности могут приводить к значительным различиям в результатах, причем не только количественным, но даже и качественным. Особенно это касается течений со сложной пространственной структурой, таких как сверхзвуковые струйные течения, пристеночные отрывные течения разных типов, нестационарные течения в кавернах и миникавернах. Исходя из вышеизложенного, тема диссертационной работы Лариной Е.В., в которой предлагаются и верифицируются новые модели турбулентности, является актуальной.

**Научная новизна полученных результатов**

В работе получено достаточно много новых научных результатов как физического, так и методического характера. Предложены три модификации разработанной ранее модели турбулентности (Olsen, Coakley, 2001г.), основанной на трех параметрах: кинетической энергии турбулентности  $k$ , частоте турбулентных пульсаций  $\omega$  и турбулентной вязкости  $\mu_t$ . Предложенные модификации связаны с

введением трех новых временных масштабов турбулентности. Первый масштаб определяется зависимостью от турбулентного числа Рейнольдса, второй - от градиента кинетической энергии турбулентности, третий - от отношения генерации кинетической энергии турбулентности к её диссипации. Все предложенные варианты учета временных масштабов приводят к более раннему свободному отрыву в течениях внутри сопел и замедляют рост толщины слоя смешения в струйных течениях, тем самым, усиливая интенсивность ударных волн вблизи оси струи. Как показано в диссертации, это приводит к улучшению соответствия результатов моделирования экспериментальным данным.

Предложено также использовать релаксационное уравнение в комбинации с  $k-\varepsilon$  моделями турбулентности, что приводит к новому классу  $k-\varepsilon-\mu_t$  моделей. В большей части проводимых исследований автор использовал высокорейнольдсовую  $k-\varepsilon-\mu_t$  модель на основе коэффициентов «стандартной»  $k-\varepsilon$  модели и с использованием пристеночных функций, учитывающих градиент давления. С помощью данной модели получено большое количество результатов расчётов, позволяющих сделать вывод, что данная модель является одной из лучших RANS моделей турбулентности для моделирования таких высокоскоростных течений, как сверхзвуковая струя, отрывные течения в соплах, течения вблизи сверхзвуковых и гиперзвуковых сжимающих углов и течения в воздухозаборных устройствах.

### **Практическая значимость результатов диссертационной работы**

Предложенные автором модели турбулентности пригодны для моделирования как стационарных, так и нестационарных течений в широком диапазоне скоростей и повышают точность моделирования сложных течений при наличии взаимодействия ударных волн с пограничными слоями и слоями смешения. Разработанный программный комплекс позволяет получать осреднённые характеристики турбулентных потоков газа в двумерной и трехмерной постановках для задач внешней и внутренней аэродинамики летательных аппаратов. Эти результаты диссертации представляют практическую ценность для работы по проектированию и модернизации авиационно-космической техники, а также для анализа аварий и нестандартных ситуаций.

### **Обоснованность и достоверность результатов**

Разработанные в диссертации методы математического моделирования прошли тщательную верификацию путем сопоставления результатов либо с известными экспериментальными данными, либо с результатами прямого численного моделирования других авторов.

### **Содержание диссертации**

Представленная к защите диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемых источников.

Во введении соискатель представил свои соображения об актуальности работы, сформулировал цели диссертации, основные положения, выносимые на защиту, научную новизну результатов и их практическую ценность, аргументировал достоверность полученных результатов, кратко охарактеризовал метод исследования, указал личный вклад в получение результатов диссертации и содержание работы.

В первой главе описана математическая модель турбулентного течения газа и представлены результаты численных исследований турбулентных течений,

удаленных от твердых поверхностей. Выбранная автором математическая модель представляет собой систему уравнений, содержащую осредненные по Фавру уравнения переноса массы, импульса, энергии и турбулентных характеристик течения, и соответствующие данным уравнениям начальные и граничные условия. Автор проанализировал, как меняется поведение вязкости при использовании дополнительного уравнения трехпараметрических моделей при затухании турбулентности. Показано, что, при отклонении турбулентной вязкости от равновесного значения, турбулентная вязкость, рассматриваемая по линии тока, с течением времени восстанавливается до своего равновесного состояния. При исследовании взаимодействия турбулентности с ударной волной проведен анализ часто используемых двухпараметрических моделей турбулентности и выявлены недостатки этих моделей при описании данного течения.

Далее рассматривается более сложная задача моделирования сверхзвуковой недорасширенной струи. Проведено моделирование с использованием нескольких моделей турбулентности, в том числе с распространенными вариантами  $k-\varepsilon$  и  $k-\omega$  модели, с трехпараметрической  $k-\omega-\mu_t$  моделью (Olsen, Coakley, 2001г.), с новыми предложенными в диссертации трехпараметрическими моделями турбулентности и с  $k-\varepsilon$  моделью турбулентности с учетом неравновесности турбулентности по Chen. Проведено исследование сходимости решения по сетке. Показано, что, по сравнению с другими моделями, предложенные модели позволяют управлять положениями скачков уплотнения и их интенсивностью, приводя к лучшему соответствию с экспериментом.

Во второй главе описан численный метод, используемый для решения поставленных в диссертации задач. На основе математической модели и численного метода разработан программный комплекс для расчета пространственных турбулентных течений на неструктурированных сетках. Приведены результаты тестирования программного комплекса на разнообразных течениях.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования течения внутри плоских и осесимметричных сопел с коническими и профилированными сверхзвуковыми частями при наличии отрыва потока от стенок. Среди рассмотренных вариантов представлен экспериментальный случай, предложенный на европейской конференции по аэрокосмическим наукам в качестве сложного теста для моделей турбулентности. Результаты, полученные с использованием трехпараметрических  $k-\varepsilon-\mu_t$  и  $k-\omega-\mu_t$  моделей, оказались в этом случае близки по положению отрыва к экспериментальным результатам, тогда как большинство моделей турбулентности, представленные в литературе, дают положение отрыва, значительно отличающееся от результатов эксперимента.

В четвёртой главе рассматриваются сверхзвуковые и гиперзвуковые двумерные течения вблизи сжимающего угла и ступеньки с наклонной гранью, а также течения в воздухозаборниках. В таких течениях, в отличие от течений внутри сопел, реализуется ограниченный отрыв потока. Рассмотрены как случаи небольших углов наклона сжимающего угла, так и значительных по величине углов, вблизи которых образуется развитое отрывное течение. Заметное отличие моделей турбулентности проявляется именно для случая протяженных развитых отрывов, и в этих случаях предложенная автором  $k-\varepsilon-\mu_t$  модель турбулентности приводит к соответствию с экспериментом по протяженности отрывной области и интенсивности скачка давления.

В пятой главе рассматривается нестационарная задача о турбулентном течении внутри мелкой каверны. Оценивается влияние геометрического фактора на частоты пульсационных режимов. На этом примере продемонстрировано, что программный комплекс позволяет проводить моделирование нестационарных задач с приемлемой точностью.

В заключении изложены основные результаты диссертации.

### Замечания

1. В работе рассмотрено влияние неравновесной вязкости в случае затухания однородной изотропной турбулентности. Желательно было бы добавить теоретическую оценку влияния неравновесной вязкости для таких течений, как пограничный слой на плоской пластине и течение с постоянным сдвигом.

2. Не во всех рассматриваемых расчетных случаях имеются полные описания параметров набегающего потока и граничных условий.

3. Следовало больше внимания уделить вопросу о степени универсальности предложенных моделей турбулентности.

### Заключение

Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в 13 публикациях (3 в изданиях, включенных в перечень ВАК) и широко апробированы в докладах на российских и международных конференциях и семинарах. Стиль, язык и оформление работы соответствуют требованиям, предъявляемым к диссертациям.

Результаты работы могут быть использованы для расчёта внутренней и внешней аэродинамики при проектировании и отработки изделий в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», ОАО ТМКБ «Союз», ОАО «ВПК «НПО Маш», ФГУП «Конструкторское бюро машиностроения», НПО «Сплав».

Автореферат диссертации отражает основные результаты работы и соответствует содержанию диссертации.

В целом, представленная диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Ларина Е.В., заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».


Отзыв обсужден и одобрен на заседании секции НТС отделения 2  
(протокол № 8 от «01» декабря 2014 г.)

Заместитель начальника отделения  
начальник отдела,  
д.т.н., профессор



Д.М. Борисов

Главный научный сотрудник,  
д. ф.-м. н., профессор



С.Г. Черкасов

Старший научный сотрудник,  
к. ф.-м. н.



А.В. Ананьев