

## ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук, руководителя отдела «Газодинамика старта» ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ЦНИИмаш) Сафронова Александра Викторовича на диссертацию Лариной Елены Владимировны «Численное моделирование высокоскоростных турбулентных течений на основе двух и трехпараметрических моделей турбулентности», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа Лариной Е.В. посвящена проблеме моделирования высокоскоростных (трансзвуковых, сверхзвуковых и гиперзвуковых) течений газа и выбору пригодных для этого моделей турбулентности. В настоящее время, существуют разнообразные подходы к моделированию турбулентности, такие как вихреразрешающие методы (LES) и полуэмпирические модели с осредненными уравнениями Навье-Стокса (RANS), а также гибридные методы, совмещающие LES моделирование вдали от стенки и RANS моделирование вблизи стенок. И каждый из этих подходов содержит большое количество модификаций. Однако не существует универсальной модели турбулентности, которая реализует расчет всех типов течений, поэтому представляют научный и практический интерес задачи рассматриваемой работы по усовершенствованию и разработке новых моделей с тестированием и определением границ их применимости.

Для решения ряда практических задач газодинамики, не требующих разрешения на подробной сетке большей части спектра турбулентных пульсаций, как для задач акустики, а также в случаях, когда влияние мгновенных параметров потока на средние не очень большое, подход RANS является наиболее приемлемым. RANS модели широко используются для проведения инженерных и научных расчетов в крупных организациях в России и за рубежом.

В диссертационной работе основное внимание уделено моделям турбулентности в рамках RANS. Поставлена задача по созданию модели, применимой для широкого класса высокоскоростных течений, в том числе течений с отрывами, с взаимодействиями ударных волн с пограничными слоями и со слоями смешения, и особенно при гиперзвуковых скоростях. Поэтому тема диссертации является актуальной.

В работе рассмотрена применимость достаточно новой модели турбулентности с добавлением релаксационного уравнения к классическим двухпараметрическим моделям ( $k-\omega-\mu_t$ ) к моделированию высокоскоростных течений с отрывами и течений в сверхзвуковых струях. С целью повышения точности моделирования для широкого диапазона течений предложены и проанализированы новые модификации модели турбулентности, а именно три варианта трехпараметрической  $k-\omega-\mu_t$  модели турбулентности с различными функциональными зависимостями времени релаксации турбулентной вязкости к равновесному значению, и новая трехпараметрическая  $k-\varepsilon-\mu_t$  модель турбулентности. На сложных течениях

показано, что все предложенные варианты моделей являются вычислительно экономичными, и позволяют повышать точность моделирования. Предложенные модели автора хорошо показали себя при расчете дальних скачков уплотнения на оси недорасширенной сверхзвуковой струи, положения отрыва и восстановления статического давления при перерасширенном режиме течения газа внутри плоских и осесимметричных сопел, для расчетов сверхзвуковых и гиперзвуковых течений вблизи сжимающего угла большого и малого наклона, течений в воздухозаборном устройстве.

Рассматриваемые течения часто встречаются при проектировании элементов летательных аппаратов и элементов двигательных установок летательных аппаратов, в частности сопел и воздухозаборных устройств, в задачах взаимодействия струй с преградами, такими как оперение, пилоны. Разработанный программный код позволяет анализировать конструкторские решения, связанные с выбором формы воздухозаборных устройств, обтекателей, отсеков летательных аппаратов, поэтому результаты исследования являются практически значимыми.

Полученные в работе результаты являются обоснованными и достоверными, что обусловлено сравнением с экспериментальными результатами и результатами расчетов других авторов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников из 184 наименований. Текст диссертации изложен на 165 страницах машинописного текста, содержит 140 рисунков.

Во введении показана актуальность работы, сформулированы цели диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна результатов и их практическая ценность, изложены аргументы, указывающие на достоверность результатов. Также описан личный вклад соискателя в получение результатов диссертации и содержание работы.

В первой главе представлена математическая модель турбулентного течения газа на основе осредненных по Фавру уравнений переноса массы, импульса, энергии и уравнений используемых в работе двухпараметрических моделей турбулентности. Здесь же описана релаксационная  $k-\omega-\mu_t$  модель, приведено дополнительное уравнение для турбулентной вязкости данной модели и уравнения  $k-\omega-\mu_t$  и  $k-\varepsilon-\mu_t$  моделей, предложенных автором. Описаны используемые граничные условия, в том числе и граничные условия для турбулентной вязкости. Проанализировано поведение неравновесной турбулентной вязкости в задаче затухания однородной изотропной турбулентности. Представлено численное исследование моделей турбулентности в задаче взаимодействия однородной изотропной турбулентности с прямым скачком уплотнения. Из всего набора параметров двух- и трехпараметрических моделей турбулентности выявлен единственный фактор, влияющий на значения турбулентных характеристик за ударной волной – отношение порождения кинетической энергии

турбулентности к скорости диссипации. Предложенные автором модели использованы при моделировании течения в сверхзвуковой недорасширенной струе в двумерном случае. При этом получено, что учет дополнительного времени релаксации в  $k-\omega-\mu_t$  и использование  $k-\varepsilon-\mu_t$  модели позволяют управлять положением системы скачков уплотнения и улучшать результаты по сравнению с имеющимися известными моделями турбулентности.

Во второй главе представлено описание и тестирование программного комплекса расчета пространственных турбулентных течений на неструктурированных сетках. Кратко описывается используемый численный метод. Представлены результаты тестовых расчетов, демонстрирующих работоспособность разработанного программного комплекса, таких как течение в пограничном слое, в модели ГПВРД, течения в осесимметричной струе.

В третьей главе проводится дальнейшее совершенствование и анализ предложенных моделей турбулентности для турбулентных течений внутри сопел различной конфигурации. Полученные результаты демонстрируют улучшение предсказания положений отрыва, достигаемое использованием предложенных автором моделей и исходной  $k-\omega-\mu_t$  модели.

В четвёртой главе проводится исследование применимости двух- и трехпараметрических моделей в случае сверхзвукового и гиперзвукового турбулентного течения вблизи сжимающего угла. Представлены результаты моделирования сверхзвукового течения в воздухозаборнике. Автор показывает, что постановка задачи и полученные результаты удовлетворяют экспериментальным данным.

В пятой главе проводится исследование двумерного и трехмерного нестационарного течения внутри каверны с различными геометрическими факторами, такими как полностью открытая каверна, каверна с прямоугольным люком и тремя различными по протяженности отверстиями в них, с цилиндрическим люком и отверстием в центральном и смещенном положениях. Оценены спектральные характеристики пульсационного режима и влияние на них геометрического фактора.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

В работе выявлены следующие недостатки.

1. В большей части работы основным параметром, по которому сравниваются модели турбулентности, является статическое давление. Такой выбор не всегда достаточен. Так в струйном течении можно было дополнительно провести сравнение по числу Маха, скорости или давлению торможения Пито на оси струи, а в задаче обтекания сжимающего угла по тепловому потоку или коэффициенту трения.

2. Как известно, имеются проблемы моделирования турбулентной вязкости в высокотемпературных сверхзвуковых течениях, однако автором не показана применимость предложенных моделей для этого случая.

3. В работе проведено тестирование предложенных автором моделей турбулентности на разнообразных высокоскоростных течениях, но большое количество выводов в работе затрудняет понимание того, какая же из рассмотренных моделей турбулентности, по мнению автора, является лучшей для расчета высокоскоростных турбулентных течений.

Сделанные замечания по работе не отражаются на высокой оценке уровня диссертации, которая в целом содержит достаточно подробные исследования, проведенные квалифицированно и с пониманием вопросов, связанных с физическими особенностями и численным моделированием турбулентных течений. Диссертация представляет законченную научно-исследовательскую работу, выполнена на высоком научном уровне. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Основные результаты работы апробированы на международных и Российских конференциях и опубликованы в 13 публикациях, в том числе трех статьях, вышедших в журналах из списка ВАК.

Считаю, что диссертация «Численное моделирование высокоскоростных турбулентных течений на основе двух и трехпараметрических моделей турбулентности» соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, п. 7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Ларина Елена Владимировна заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы».

#### **Официальный оппонент**

кандидат физико-математических наук,  
руководитель отдела «Газодинамика старта»  
ФГУП «Центральный научно-исследовательский  
институт машиностроения» (ЦНИИмаш).  
141070, Московская область, г. Королёв,  
ул. Пионерская, дом 4;  
раб. тел: 8 (495)513-44-40;  
e-mail: safronov@tsniimash.ru

*А.В. Сафронов*  
03.12.14

А.В. Сафронов

Подпись Сафронова А.В. заверяю  
Советник генерального директора-  
главный ученый секретарь,  
д.т.н., профессор



*Ю.Н. Смагин*

Ю.Н. Смагин