

Отзыв официального оппонента 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».

Основная цель диссертации - разработать, проверить и применить трехпараметрические релаксационные модели турбулентной вязкости для моделирования высокоскоростных сжимаемых течений. Существующие популярные двух параметрические модели турбулентности типа "k-ε", "k-ω" и другие, к сожалению, неточно описывают ряд важных течений, особенно при больших положительных градиентах давления вблизи отрыва пограничного слоя от стенки. Поэтому продолжаются попытки улучшения и уточнения дифференциальных моделей турбулентности. Так в работе Olsen et al (2001) была рассмотрена модель "k-ω" с дополнительным релаксационным уравнением для турбулентной вязкости. Сходная идея развивается в работе Lillard et al (2012), в которой добавлено релаксационное уравнение для напряжения трения. В указанных работах отмечается некоторое улучшение описание течений при использовании модифицированных моделей. Поэтому систематическое исследование, которое проведено в диссертационной работе, с целью всестороннего анализа идеи добавления к известным двухпараметрическим моделям релаксационного уравнения для турбулентной вязкости, представляется важным и актуальным.

Диссертация начинается с весьма детального анализа существующих дифференциальных моделей турбулентности. Отмечаются их положительные и слабые особенности. Автором разработан программный комплекс расчета пространственных турбулентных течений на неструктурированных расчетных сетках, который имеет второй порядок точности по пространству и времени на гладких решениях. В диссертации приводятся многочисленные тестовые

расчеты известных турбулентных сжимаемых течений. В частности, прохождение турбулентности через скачок уплотнения, нерасчетное течение в круглой струе, сверхзвуковое течение в двухгранном угле, течение в четверти круглой струи, обтекание спускаемого аппарата Fire II, течение в сжимаемом пограничном слое, расчет волнолета. Расчет течения в ГПВРД (эксперимент ИПМех) при числе Маха равном 7.0 или 4.5. Наконец пробные расчеты течения методом LES в сверхзвуковой струе при числе $M=2$.

В этом тестовом разделе автором выполнен большой объем расчетных исследований с тщательным анализом точности, с проверкой сходимости по сетке. Следует отметить, что автор использовал разнообразные виды неструктурированных сеток как гексагональной так и тетраэдральной формы.

В последующих разделах работы расчетными методами проведено исследование различных сложных турбулентных сжимаемых течений, как правило, с областями отрыва. В том числе плоские и круглые конические и профилированные сопла. Течение в угле и плоском воздухозаборнике, гиперзвуковое течение около клина. Рассмотрено нестационарное течение около каверн различной формы. Все результаты сопоставлены с известными экспериментальными данными.

При решении указанных задач главное внимание уделяется анализу возможностей трех модификаций $k-\omega-\mu_t$ модели и $k-\varepsilon-\mu_t$ модели, которые были предложены автором. Кроме того, в работе анализируются возможности еще около 10 различных версий $k-\varepsilon$ моделей турбулентности (в частности: RNG, Chen, Chen & Kim, Thakur et.al., Haroutunian, Hanjalic & Launder, Murakami et al, Kenzakowski et al)

Важной особенностью работы является исследование влияния условия на расчетные результаты условия «реализуемости» при уточнении связи тензора напряжений трения и тензора скорости деформации. Кроме того, автор тщательно проанализировал роль дополнительной диссипации, связанной с эффектами сжимаемости, в частности, поправку Sarkar. При рассмотрении

пристеночных функций для расчета на грубой сетке рассмотрены варианты учитывающие наличие продольного градиента давления на стенке.

В диссертации представлено множество различных течений и анализируется большое количество различных вариантов моделей турбулентности. Эта особенность работы имеет как положительную, так и отрицательную стороны. С одной стороны автор получил уникальный материал о точности и достоверности описания самых различных сжимаемых течений при помощи известных и модифицированных моделей турбулентности. С другой стороны обилие нового материала затрудняет сделать общий вывод о наилучшей, наиболее универсальной, модели турбулентности. А так же вывести суждение о том, какую погрешность дает эта наилучшая модель при описании всех рассмотренных течений.

Отсюда вытекают некоторые более конкретные замечания по содержанию диссертации.

- 1) Отмечается, что $k-\omega-\mu_t$ модель, разработанная автором, в ряде случаев лучше других. Однако на стр.30-31 введено три определения для времени релаксации μ_t . Как следствие, в работе используется все три варианта в форме уравнений (1.20)-(1.22). Получаются три различных $k-\omega-\mu_t$ модели. Но не указано, какая из них наилучшая.
- 2) На стр. 117 написано, что «наиболее удачными для моделирования указанного течения являются высокорейнольдсовы модели: двухпараметрическая $k-\epsilon$ модель Chen [90] с моделью сжимаемой диссипации Sarkar [149] и трехпараметрическая $k-\epsilon-\mu_t$ модель без учета сжимаемой диссипации». Такое сравнение не совсем корректно, так как в одном случае используется модель с введенным эффектом сжимаемости, а в другом без учета этого эффекта.

3) Автор показал потенциальные возможности своей программы для расчета турбулентной струи методом моделирования крупных вихрей (метод LES). Однако этот раздел работы не доведен до конца. В расчете значительный участок струи ламинарный, что противоречит физике течения.

В целом считаю, что работа Лариной Елены Владимировны выполнена на высоком научном уровне. Автор продемонстрировал хорошее знание современных моделей турбулентности, предложил несколько новых трехпараметрических вариантов. Диссертация содержит много новой и полезной информации, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Начальник сектора ЦИАМ им. П.И. Баранова

Профессор, д.т.н.

(Секундов А.Н.)

1 декабря 2014 г.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР.
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ.
«Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова»
111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2
e-mail: secundov@ciam.ru
тел: +7(495) 362-93-70

Подпись сотрудника ЦИАМ Секундова Александра Николаевича удостоверяю.

Ученый секретарь Совета ЦИАМ, к.ф.-м.н.



Исакова Н.П.