

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, доцента Власенко Владимира Викторовича, заместителя начальника лаборатории Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского»
на диссертационную работу Тушканова Алексея Сергеевича
"Термически и химически неравновесные процессы в факеле маршевого двигателя твердого топлива", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация Тушканова А.С. посвящена разработке математической модели для описания течений в высокоскоростных, химически активных турбулентных струях, ее валидации и применению к расчету факелов жидкостного и твердотопливного ракетных двигателей на разных высотах полета.

Данное направление исследований является **актуальным**, поскольку разработка высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) невозможна без параметрических расчетов, позволяющих оценить влияние различных параметров на характеристики ЛА. Течение в факеле ракетного двигателя при гиперзвуковом полете на больших высотах (число Маха 5-10, высота 30-100 км) отличается взаимодействием многих физических факторов – турбулентности, неравновесной кинетики, неравновесной термодинамики и многофазных эффектов. Аналитическое описание таких сложных явлений невозможно, наземный эксперимент неспособен воспроизвести корректно условия полета, и численное моделирование становится основным источником информации, необходимой для выбора геометрии и режимов работы ЛА. Существующие коммерческие программные продукты, предоставляющие широкие возможности по выбору математической модели для описания течений газа, обладают рядом существенных недостатков. В частности, в них не реализованы модели влияния химических реакций на процессы турбулентного переноса. Но главным недостатком коммерческих пакетов является отсутствие доступа к программному коду, отсутствие полной информации об используемых в коде регуляризирующих алгоритмах, обеспечивающих устойчивость расчета и реализуемость получаемых в расчете параметров течения, невозможность добавлять собственные алгоритмы, которые необходимы при решении сложных практических задач. В этих условиях безусловную ценность представляют собственные программные продукты, которые могут развиваться автором по мере накопления опыта решения задач вычислительной аэродинамики и по мере появления новых математических моделей для описания протекающих в высокоскоростном потоке процессов. **Автор диссертации принимал активное участие** в разработке математических моделей для такого программного продукта, **участвовал** в его создании и тестировании, а затем **применил** созданную программу к решению задачи, **актуальной** для создания новых ЛА.

Диссертация объемом 167 страниц включает введение, 4 раздела, заключение и список литературы (115 наименований), 62 рисунка и 19 таблиц.

Научные положения и выводы диссертационной работы **обосновываются** применением фундаментальных законов газовой динамики и тепломассообмена, а также

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. №
"10 12 2019"

валидацией программы, реализующей разработанные методы. Валидация была проведена путем сопоставлением полученных результатов расчетов ряда классических тестовых задач с экспериментальными данными, опубликованными в открытой печати.

Достоверность результатов исследования подтверждена тем, что полученные результаты математического моделирования различных классов задач сопоставлены с экспериментальными данными и опубликованы в рецензируемых журналах, а математическая модель обсуждена на видеосеминаре по аэромеханике ЦАГИ–ИТПМ СО РАН–СПбПУ–НИИМ МГУ–ОИВТ РАН.

Результаты исследования содержат **научную новизну**, заключающуюся в следующем:

1. Записана SST модель турбулентности с поправкой на сжимаемость и сформулировано граничное условие для нее.

2. Создана модель влияния теплоподвода, возникающего в ходе химических реакций, на процессы турбулентного переноса, на основе гипотезы о равновесном состоянии в уравнении для турбулентного потока скалярной величины. Модель позволила получить улучшить согласование между экспериментальными и расчетными данными.

3. Описана модель влияния турбулентности на скорости химических реакций на основе функции плотности вероятности в предположении о статистической независимости пульсирующих параметров плотности, температуры и концентраций.

4. Показано, что предложенная модель влияния турбулентности на скорости химических реакций приводит к более раннему воспламенению.

5. При использовании поправки на сжимаемость получено более хорошее совпадение с экспериментальными данными по течению в модельной высокоскоростной камере сгорания, чем при использовании модели турбулентности без этой поправки.

6. Обнаружено, что на высотах 25-30 км расчеты без учета влияния турбулентности на скорости химических реакций и с учетом этого влияния дают близкие результаты, а на высоте 37 км заметно отличаются. Дано правдоподобное объяснение полученных результатов.

Значимость для науки заключается в том, что предложенная диссертантом методика позволяет оценить вклад от взаимного влияния турбулентности и горения в структуру и характеристики высокоскоростных, химически активных турбулентных струй.

Для **практики значимость** заключается в том, что результаты могут быть применены в работе таких предприятий, как АО «Корпорация «МИТ», АО «ГосМКБ «Радуга», АО «НПО машиностроения», ПАО «РКК «Энергия» при разработке новых, перспективных изделий, а так же при модернизации существующих образцов авиационной и ракетно-космической техники.

Раздел 1 представляет собой обзор литературы по теме диссертации. Дан исторический обзор развития моделей турбулентного горения, затем кратко рассмотрены

модели микроламинарных пламен (flamelet), фронтные модели на основе скорости ламинарного пламени (модель Зимонта), модели реактора частичного перемешивания (EDC Магнуссена и другие) и методы, основанные на введении функции плотности вероятности (ФПВ) реализации различных значений параметров течения (обычно – температуры и концентраций). Далее рассмотрены известные работы по учету влияния тепловыделения на процессы турбулентного переноса (модели переменных числе Прандтля и Шмидта). Раздел 1.5 также анонсирует обзор методов учета влияния эффектов сжимаемости в турбулентном течении, но, похоже, автор забыл включить этот обзор в текст раздела. К сожалению, отсутствуют также данные по предшественникам автора в области моделирования термически неравновесных и многофазных течений, хотя такие течения рассматриваются в диссертации.

В **Разделе 2** описана математическая модель высокоскоростных химически неравновесных турбулентных течений. Выписана полная система уравнений Навье-Стокса для многокомпонентного газа с неравновесными реакциями, с дополнительными источниковыми членами, описывающими взаимодействие с другими фазами, и со всеми замыкающими соотношениями. Для термически неравновесных течений выписаны уравнения переноса колебательной энергии (для каждой колебательной моды) и механизмы колебательного обмена. Представлены замыкающие соотношения для описания химической кинетики, а также используемые в работе кинетические схемы. Для описания турбулентных течений вводятся уравнения Рейнольдса (с осреднениями по Фавру для высокоскоростных сжимаемых потоков). Рассмотрены модели турбулентности: модель для напряжений Рейнольдса Лаундера, Риса и Роди с поправкой на сжимаемость Гомеша и Гиримаджи, $k - \varepsilon$ с поправкой Молчанова на сжимаемость, SST Менгера.

В п.2.8.7 представлена вынесенная диссертантом на защиту модель SST с поправкой на сжимаемость. Автор берет модель $k - \varepsilon$ с поправкой на сжимаемость из работы А.М.Молчанова (“Вестник МАИ”, т.16, №1, 2009) и выводит из нее уравнение для параметра ω (пренебрегая, как это часто делают, разницей в коэффициентах турбулентной диффузии параметров k , ε и ω). В результате в уравнении для параметра ω возникает добавочный член, зависящий от турбулентного числа Маха (причем он выключается около стенок). Уравнение для k берется из модели Молчанова. Коррекция на сжимаемость из модели Молчанова также вводится в коэффициент турбулентной вязкости (за исключением SST-члена). В результате получается модель, которая в свободной турбулентности должна быть очень близка к модели $k - \varepsilon$ с поправкой А.М.Молчанова. Выписаны граничные условия для уравнений этой модели.

В п.2.9 описана идеология вынесенной автором на защиту модели для описания влияния теплоподвода на турбулентный перенос (модель переменных турбулентных чисел Шмидта и Прандтля). В целом эта модель относится к ряду моделей, восходящих к идее, сформулированной Нагано и Кимом (“Journal of Heat Transfer”, Vol.110, 1988): числа Прандтля и Шмидта связываются с отношением характерных времен турбулентного переноса импульса, тепловой энергии и массы химических компонентов. В п.2.9.1 формула для турбулентного числа Прандтля-Шмидта выводится из гипотезы о равновесном состоянии (равенстве нулю источникового члена) в уравнении для турбулентного потока скалярного параметра f . При этом, правда, автор утверждает, что можно пренебречь источниковым членом $\overline{u_i'' \omega}$ в уравнении для $\overline{\rho f u_i''}$, а затем делает

предположение о том, что *мгновенное* поле скорости является тонкослойным (что верно только для случая малых турбулентных пульсаций). Но такого рода упрощения типичны для подобных приближенных моделей. Для определения характерных времен турбулентного переноса тепла и химических компонентов приходится решать дополнительные уравнения в частных производных для $\widetilde{h}_t^{n^2}$ и для $\sum_s \widetilde{C}_s^{n^2}$, а также для диссипации этих величин. Выбор эмпирических коэффициентов модели основан на данных для пассивного скаляра из работы Сандерса и Гокалпа (“Physics of Fluids” No.10, 1998). Выписаны граничные условия для уравнений модели.

В п.2.10 описана вынесенная автором на защиту модель учета влияния турбулентности на средние скорости химических реакций. В основу этой модели легли идеи из работы Гиримаджи (AIAA-91-43645): пульсирующие значения плотности, температуры и массовых концентраций полагаются независимыми, и для них вводятся предписанные ФПВ. Плотность полагается равной среднему значению в данной точке. Для температуры вводится гауссова ФПВ или бета-ФПВ. Для вектора концентраций вводится многомерная бета-ФПВ.

В разделе 2.11 описана математическая модель многофазного течения с полидисперсными частицами твердой фазы (в смешанной постановке Лагранжа-Эйлера).

В разделе 3 описаны результаты расчетов. Сначала для валидации моделей, вынесенных на защиту, рассматриваются классические тесты с предельно упрощенной геометрией: изобарически-изотермические затопленные струи; химически реагирующие звуковые недорасширенные струи при высокой степени нерасчетности; холодная сверхзвуковая струя водорода, истекающая в высокотемпературное затопленное пространство; сверхзвуковая струя водорода в горячем спутном сверхзвуковом потоке воздуха (эксперимент Эванса и др.); пристенная плоская струя водорода в канале с горячим спутным сверхзвуковым потоком воздуха (эксперимент Берроуза и Куркова). В первых двух тестах проверяется поправка на сжимаемость к модели SST (которая в подписях к рисунку почему-то называется *k-ε* моделью). Результаты хорошие. В третьем тесте демонстрируется влияние переменного числа Прандтля, но почему-то только для одного из нескольких рассмотренных режимов. В четвертом тесте показано заметное влияние переменных числе Прандтля и Шмидта, которое, тем не менее, не позволяет вполне приблизиться к эксперименту. Затем на четвертом и пятом тестах тестируется модель для влияния турбулентности на средние скорости реакций, но влияние оказывается незначительным. Такой же результат был получен в диссертации А.А.Ширяевой, выполненной под руководством рецензента, с использованием других моделей турбулентного горения. Следует добавить, что в работе A.Shiryayeva, V.Sabelnikov (doi: 10.1063/1.5065172) дан критический анализ экспериментов Эванса и Берроуза-Куркова, который делает сомнительной пригодность этих экспериментов для валидации моделей турбулентного горения. Важный факт, на который указывает автор – то, что включение модели турбулентного горения приводит, как и в экспериментах, к более раннему воспламенению. Не всякая модель позволяет получить этот результат (например, на основе подхода PaSR это затруднительно).

В разделе 3.4 исследуется проблема срыва догорания в выхлопной струе ЖРД с продуктами сгорания углеводородного топлива на разных высотах (число Маха на срезе

сопла $M \sim 2.5$). Сравнения с экспериментом здесь нет. Расчеты с использованием модели SST с поправкой на сжимаемость автора сравниваются с классической моделью $k-\epsilon$ (без поправки на сжимаемость и с поправкой Саркара) и с моделью $k-\epsilon$, в которой вводится поправка только к турбулентной вязкости (эта модель была предложена А.М.Молчановым и описана в его книге, изданной МАИ в 2017 г.). Обнаружен интересный эффект: квазиламинарные расчеты и расчеты с учетом турбулентного горения дают близкие результаты на высотах 25-30 км (когда есть догорание) и на высоте 37 км (когда догорания нет), а на промежуточных высотах заметно различаются. При использовании модели турбулентного горения догорание сохраняется до большей высоты. Интересно, что модель SST и модель $k-\epsilon$ с поправкой А.М.Молчанова из книги 2017 г. тоже заметно расходятся лишь на переходных высотах. Дано правдоподобное физическое объяснение этого результата.

Наконец, в разделе 3.5 с использованием модифицированной автором модели SST выполнено моделирование эксперимента NASA (AIAA-2010-1127) с модельной камерой сгорания ГПВРД на водородном топливе (число Маха на входе $M=2$). Получено неплохое согласование расчета и эксперимента, причем использование поправки на сжимаемость приближает расчет к эксперименту.

Раздел 4 посвящен параметрическому исследованию выхлопа типичного ЖРД и типичного РДТТ на гиперзвуковых скоростях ($M=5 \dots 10$) на высотах от 30 до 100 км. Сопоставления с экспериментом и другими расчетами, к сожалению, нет. Этот раздел описан крайне скупо – много графиков и мало текста. В результате расчетов получены распределения тех параметров, которые необходимы для расчета выхлопных струй двигателей, и тех параметров, которые необходимы для расчета сигналов от РД в оптическом диапазоне при наличии атмосферы. Отличие колебательных температур от поступательно-вращательной усиливается с ростом высоты полета. Влияние твердых частиц возрастает с ростом высоты. Колебательная релаксация проявляется более сильно. Также на рисунках можно обнаружить, что на средних высотах в струе образуется “кожух” из твердых частиц, сконцентрированных на периферии струи.

Среди выводов, сделанных по работе диссертантом, следует отметить вывод 2: “Показано, что учет воздействия турбулентных пульсаций на горение проявляется, преимущественно, в задачах воспламенения горючего и срыва догорания в факеле ракетного двигателя. В случае развитого горения влияние турбулентности на химические реакции снижено.”

По работе можно сделать следующие **замечания**.

1. Недостатком диссертации является отсутствие описания постановки расчетов: используемого численного метода, численных граничных условий и расчетной сетки. Все эти детали могут существенно влиять на результаты расчетов. Это влияние исчезает лишь при сходимости численного решения по шагу сетки. Но данных по такой сходимости в работе нет.
2. Общим недостатком используемого метода ФПВ является то, что в нем используется предписанный вид ФПВ для температуры и концентраций, который никак не учитывает физические особенности турбулентного горения – прежде всего тот факт, что пульсации температуры и концентрации определяются процессами,

протекающими на уровне мельчайших турбулентных вихрей. Для сравнения: в методе микроламинарных пламен простой вид ФПВ предписывается только пульсациям инертной величины, а распределение температуры и концентраций получается из решения уравнений микроламинарного пламени. Но даже в методе микроламинарных пламен предписанная ФПВ дает плохие результаты, как показано в диссертации А.А.Ширяевой. Тем более ненадежным является использование предписанной ФПВ в методе, используемом автором.

3. Второй из выводов автора следует отнести лишь к тому набору задач, которые рассмотрены в диссертации. К сожалению, в диссертации нет ни одного расчета с экспериментальными данными, который продемонстрировал бы качество предложенного метода моделирования турбулентного горения. Рассмотрены только эксперименты, где роль этого эффекта мала. Тем не менее, эксперименты с сильным влиянием турбулентности на горение существуют, в том числе и в ситуациях с развитым горением - например, эксперимент Magre et al., Combustion and Flame. 1988. № 2 (71).
4. Учитывая, что существенные практические результаты работы, описанные в разделе 4, связаны с сильным проявлением термической неравновесности и многофазных эффектов, следовало бы добавить в раздел 3 валидационные тесты, доказывающие качество описания этих физических эффектов.

Однако эти замечания не снижают общей ценности диссертации, в которой представлен уникальный опыт по разработке, валидации и практическому использованию отечественной программы, в которой реализован исключительно широкий набор сложных современных математических моделей реальных течений газа. **Работа удовлетворяет паспорту специальности 01.04.14. Основные результаты опубликованы в изданиях, рекомендуемых в ВАК. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.**

Диссертация соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Тушканов Алексей Сергеевич заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Официальный оппонент

Зам. начальника лаборатории Федерального государственного унитарного предприятия

«Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского»

Доктор физико-математических наук, доцент

Власенко В.В.

Подпись Власенко В.В. удостоверяю

Ученый секретарь Диссертационного совета ЦАГИ

М.А.Брутян

Адрес: 140180 Россия г. Жуковский,
Московская область ул. Жуковского, 1
E-mail: vlasenko.vv@yandex.ru;
Тел. +7(916)660-71-27

