

## ОТЗЫВ

**официального оппонента, кандидата физико-математических наук, Власенко Владимира Викторовича на диссертацию Селезнева Романа Константиновича «Расчетно-теоретические исследования газодинамики и горения в камерах прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) и гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ГПВРД)», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»**

Диссертация Селезнева Р.К. описывает опыт автора по разработке и применению упрощенных (нульмерных, квазиодномерных и двумерных) математических моделей течений с горением в ПВРД и ГПВРД. Данный класс задач в настоящее время вызывает повышенный интерес во всем мире, поскольку разработка высокоскоростных (сверх- и гиперзвуковых) летательных аппаратов должна стать приоритетным направлением развития как военной, так и гражданской авиации на несколько ближайших десятилетий.

В современной до- и трансзвуковой авиации ресурсы научной и инженерной мысли уже почти исчерпаны и идет борьба за выигрыш в доли процента интегральных характеристик ЛА. При этом для таких типов ЛА возможны параметрические трехмерные расчеты на базе уравнений Рейнольдса, открывающие широкие возможности для применения методов оптимизации. Все большую роль начинают играть расчеты на базе метода прямого численного моделирования крупных вихрей (LES).

При разработке высокоскоростных ЛА и в особенности при разработке двигателей для высокоскоростных ЛА ситуация имеет не столь оптимистический характер. Течения с горением в ПВРД и особенно в ГПВРД характеризуются взаимодействием физических процессов с очень широким разбросом пространственных и временных масштабов, что создает непреодолимые препятствия для параметрических расчетов в трехмерной постановке. Экспериментальное исследование высокоскоростных течений крайне дорого, и точность измерений обычно весьма мала. Поэтому вплоть до настоящего времени на стадии предварительного проектирования ПВРД и ГПВРД, а также на стадии подготовки эксперимента используются упрощенные математические модели, которым посвящена данная работа. Новые и новые работы на эту тему публикуются в современных научных журналах и книгах. Так что актуальность работы Селезнева Р.К. не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из Введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения.

Во Введении обоснована актуальность выполненных исследований, сформулирована цель работы и основные задачи, которые решались в ходе исследований; перечислены результаты, имеющие научную новизну и практическую значимость; указаны основные положения и результаты, вынесенные на защиту; обоснована степень достоверности проведенных исследований. Основные результаты работы представлены на 11 значимых всероссийских и международных профильных научных конференциях и семинарах. Список публикаций автора по теме работы содержит 13 статей, 5 из которых включены в международные базы данных и опубликованы в изданиях, включенных в список ВАК.

В Главе 1 описана разработанная автором структурированная база данных по экспериментальным исследованиям, моделирующим процессы в ПВРД и ГПВРД. Описаны 24 классических эксперимента, в т.ч. эксперименты Бэрроуза и Куркова, Биллига и Уоллтропа, Эванса, Шекснайдера и Бича, и др.; эксперименты ЦАГИ, ЦИАМ, CARDC и др. ведущих научно-исследовательских организаций; эксперименты в крупнейших университетах (Мичиган, Квинсленд, Вирджиния); эксперименты, выполненные в ходе известных международных проектов (HyShot, HIFiRE). Для каждого эксперимента в базу

данных включена информация о классе течения, геометрии модели и условиях эксперимента, основные результаты эксперимента и основные результаты расчетно-теоретических работ, в которых анализировался данный эксперимент. Данная база данных весьма полезна при валидации разрабатываемых моделей течения и компьютерных кодов, она свидетельствует о широком кругозоре и компетентности автора в рассматриваемой области науки. Материалы, содержащиеся в базе данных, используются автором в других частях диссертации для валидации созданных им упрощенных моделей течения.

В Главе 2 подробно описаны нульмерная методика расчета ГПВРД, основанная на известной книге Хейзера и Пратта, и нульмерная методика расчета ПВРД, основанная на разработках МАИ. Для верификации обеих методик используются данные МАИ. На основе первой методики построены зависимости удельного импульса модельного ГПВРД с заданными характеристиками рабочего процесса от высоты и от числа Маха полета. На основе второй методики построен график зависимости внутренней тяги типичного ПВРД от числа Маха полета. Предложен способ определения геометрии ПВРД по заданной силе тяги. В заключительном разделе Главы анализируются преимущества и недостатки нульмерных моделей. Нужно отметить, что нульмерные модели, основанные на обобщении экспериментальных данных, до сих пор являются существенным элементом при разработке ПВРД и ГПВРД. В случае ПВРД эти методики могут давать результаты, не уступающие или даже превосходящие результаты многомерного численного моделирования – при несопоставимо меньших временах счета. Следует включать нульмерные модели в цикл верификации и валидации программных продуктов.

Глава 3 посвящена разработанному автором методу численного решения жесткой системы уравнений химической кинетики. Данный метод является ключевым звеном квазиодномерных и двумерных методов расчета высокоскоростных ВРД, описанных автором в Главах 4 и 5, и от него зависит работоспособность компьютерных программ, реализующих эти методы. Автор предлагает оригинальную реализацию метода Ньютона, в которой на каждой итерации для решения системы линейных уравнений используется экономичный метод нижней релаксации. Для улучшения сходимости метода автором разработан адаптивный алгоритм выбора шага интегрирования, который обеспечивает существенное ускорение получения решения и был успешно использован автором в решенных им задачах. Подобные алгоритмы представляют высокую ценность и составляют “ноу-хау” любого программного продукта, претендующего на автономное решение широкого класса сложных практических задач. Для верификации технологии автором использованы экспериментальные данные и данные расчетов других авторов по горению водорода и метана в кислороде при постоянном давлении. При этом сопоставлены различные кинетические механизмы.

Глава 4 описывает разработанную автором диссертации квазиодномерную модель ГПВРД. Следует отметить, что ГПВРД, в отличие от ПВРД, гораздо хуже описывается нульмерными методиками из-за существенной роли смешения, неравновесного горения и др. эффектов. Решается известная система обыкновенных дифференциальных уравнений стационарного квазиодномерного течения в расширенной постановке, включающей вдув массы, теплообмен на стенках канала, неравновесные химические реакции (на основе простой глобальной кинетической схемы) и полуэмпирическую модель смешения топлива с воздухом (основанную на задании длины смешения и допускающую возможность постепенного увеличения массы топлива, вовлеченной в горение). Воздухозаборное устройство, включающее систему скачков уплотнения (которая плохо описывается в квазиодномерном приближении), рассчитывается предварительно в невязком приближении на основе известных газодинамических формул. Для валидации модели использованы данные шести экспериментов из разработанной автором базы данных. Показано, что подбором длины смешения и эффективности горения в некоторых случаях (напр, для экспериментов HyShot, VAG), можно получить хорошее согласование

распределений давления с экспериментом. Но в случаях, когда течение в ГПВРД содержит существенные ударно-волновые структуры, взаимодействующие с отрывными пограничными слоями, и с существенным влиянием турбулентности течения (эксперименты Биллига, Андерсена, университета Квинсленда, Сабельникова) некоторые элементы полученных распределений существенно расходятся с экспериментом. Это естественно, т.к. смешение и горение определяются локальными характеристиками течения, а в квазиодномерном расчете есть лишь параметры, осредненные по сечению канала. С точки зрения автора настоящего отзыва, разработанная диссертантом методика может быть рекомендована к применению в тех случаях, когда отсутствуют экспериментальные данные или данные многомерных расчетов. Если же таковые данные имеются, то более предпочтительным является подход, когда типичные для данного класса задач распределения давления используются для восстановления закономерности тепловыделения по длине канала в квазиодномерной методике. В качестве возможного применения квазиодномерной методики автором разработан способ оценки дальности полета модельного высокоскоростного ЛА.

В Главе 5 описана простая модель импульсного двигателя. Смесь пропана и воздуха поступает в реактор типа резонатора Гельмгольца, в котором при определенных условиях возникают незатухающие колебания давления, обеспечивающие эффективное перемешивание с продуктами горения и сжигание смеси по термодинамическому циклу, близкому к циклу Гемфри, с частотой около 50 Гц. За основу взяты эксперимент и модель, описанные в работе Ксу и др. (2011). Математическая модель явления аналогична модели нестационарного однородно перемешанного реактора и основана, как и модель из Главы 4, на решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений (включающей глобальную модель кинетики), но не по пространственной координате, а по времени. Автором диссертации воспроизведены результаты работы Ксу и др., а затем проведено самостоятельное параметрическое исследование, которое позволило автору установить диапазон параметров задачи (давления и температуры стенок реактора), в котором возникают незатухающие колебания давления.

Наконец, в Главе 6 автором рассмотрена более детальная модель течений в высокоскоростных камерах сгорания, основанная на решении двумерной (плоской или осесимметричной) нестационарной системы уравнений Навье-Стокса для смеси газов с неравновесными химическими реакциями при помощи компьютерного кода NERAT-2D. Решены три задачи.

Проведено моделирование эксперимента Бэрроуза и Куркова и показано, что можно получить правильную длину задержки воспламенения, если подобрать угол наклона выдуваемой струи водорода к направлению потоку воздуха.

Выполнено моделирование экспериментов Третьякова с периодическим вдувом воздуха в осесимметричную или прямоугольную камеру сгорания. Показано, что в плоской камере сгорания происходит существенная интенсификация процесса горения, вызванная, по мнению автора данного отзыва, двумя основными факторами: существенной интенсификацией смешения (прежде всего – за счет сильного возрастания поверхности смешения в возникающем вихревом движении) и ростом давления и температуры в областях вдува. Следует отметить, что нестационарные расчеты в плоской задаче можно рассмотреть как крайне упрощенную версию расчета турбулентного течения с прямым моделированием крупных вихрей, без использования подсеточной модели турбулентности (т.н. неявный LES – ILES). Однако, как указывает и сам автор, для корректного описания турбулентности все-таки требуются трехмерные расчеты. Также необходим анализ зависимости решения от сетки, что имеет принципиальное значение в методах LES. В рассмотренной же постановке скорее следует относиться к двумерной модели как к средству качественного анализа физической картины течения.

В качестве достойного завершения работы проведено сравнение результатов эксперимента HyShot и результатов его моделирования с использованием квазиодномерной и двумерной модели. Получено неплохое согласование результатов, но двумерная модель дала дополнительную информацию о структуре течения в камере.

По тексту диссертации можно высказать следующие критические замечания.

1. Глобальная модель окисления водорода Уэстбука, используемая в Главе 4, не включена в список кинетических механизмов, сопоставленных в Главе 3. И наоборот, в Главе 4 отсутствует сопоставление результатов квазиодномерных расчетов ГПВРД на основе глобальной модели кинетики с аналогичными расчетами на базе усеченного кинетического механизма с несколькими реакциями. Данные сопоставления были бы очень полезны с методической точки зрения.
2. Указанный автором в Главе 2 способ определения контура тракта ПВРД по заданной тяге будет работать корректно, только если будет добавлена связь между коэффициентами потерь полного давления в тракте ПВРД (особенно на участке 1'-2) и площадью критического сечения сопла.
3. Представленные автором двумерные расчеты эксперимента Бэрроуза и Куркова не описывают реальную картину течения, в котором водород вдувался параллельно потоку воздуха и воспламенение определялось не падением скачка уплотнения на слой смешения, а турбулентным смешением и влиянием турбулентности на протекание химических реакций. Для приближения модели течения к реальности следовало бы включить в нее модели турбулентности и турбулентного горения, либо перейти к трехмерным расчетам, выбрав сетку, достаточную для корректного описания крупномасштабной турбулентности.

Несмотря на эти недостатки, диссертация Селезнева Р.К. является хорошей научной работой, убедительно квалифицирующей автора как специалиста в области газовой динамики, физического и численного моделирования силовых установок высокоскоростных ЛА. Представленное научное исследование имеет достаточно цельный и законченный характер; оно показывает современные возможности использования упрощенных моделей для оценки характеристик ПВРД и ГПВРД. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы. Накопленный опыт, разработанные методы, базы данных и программы, безусловно, будут применяться далее – как для теоретических исследований газодинамики высокоскоростных течений, так и для решения практически важных инженерных и научных задач. Полученные в диссертации расчетно-теоретические модели, результаты и рекомендации могут быть использованы в организациях отрасли авиационного двигателестроения. Работа отвечает требованиям Положения ВАК РФ о порядке присуждения научным и научно-педагогическим сотрудникам ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент,  
начальник сектора отделения аэродинамики силовых установок ЦАГИ,  
кандидат физико-математических наук, доцент

В.В.Власенко

Подпись Власенко В.В. заверяю.

Ученый секретарь Диссертационного Совета ЦАГИ Д 403.004.01  
доктор физико-математических наук, доцент

М.А.Брутян

6.04.17.

