



Государственный научный центр Российской Федерации
Федеральное автономное учреждение

**ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени профессора Н.Е. Жуковского
ФАУ «ЦАГИ»**

Жуковского ул., д. 1, г. Жуковский, Московская область, 140180
тел.: +7 495 556-4303, факс: +7 495 777-6332, www.tsagi.ru
ОГРН 1225000018803, ИНН 5040177331, КПП 504001001, ОКПО 50205960

09.01.2023 № САЧОИ-10-10

На № _____ от _____

“УТВЕРЖДАЮ”

Заместитель генерального директора

И» -

гидродинамики

математических наук

____ / С.В.Ляпунов /

30 декабря 2022 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Ваньковой Ольги Сергеевны
«Математическое моделирование воспламенения и стабилизации горения
в предварительно не перемешанных водородно-воздушных потоках
при сверхзвуковых скоростях», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
(специальность 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы)

Диссертация Ваньковой О.В. посвящена численному исследованию стабилизации горения водорода в высокоскоростном потоке воздуха в каналах с учетом смешения и конечных скоростей химических реакций. Исследование проводится на базе двумерных или трехмерных нестационарных уравнений Рейнольдса для многокомпонентного реагирующего газа с использованием коммерческого пакета вычислительной аэродинамики ANSYS FLUENT.

Актуальность работы определяется исключительной сложностью рассматриваемого класса задач (высокие скорости, большие температуры, многомасштабное нелинейное взаимодействие разнообразных физических процессов), что препятствует как детальному теоретическому описанию течения, так и проведению детальных и надежных экспериментальных исследований. Разработка высокоскоростных

летательных аппаратов невозможна без одновременного применения и теоретических, и экспериментальных, и расчетных подходов к анализу течения. Конечно, для физических исследований предпочтительны собственные расчетные программы, которые не являются “черным ящиком” и допускают возможность вторжения в расчет специалиста, понимающего физику решаемой задачи, что обеспечивает корректность получаемого решения. Тем не менее, в цикле аэродинамического проектирования неизбежно использование коммерческих пакетов вычислительной аэродинамики – по следующим причинам: 1) в них реализован широкий набор физических моделей; 2) такие программы обладают интерфейсом, понятным для специалистов с инженерным уровнем подготовки; 3) такие программы способны сохранять устойчивость в автоматическом режиме при возникновении нефизичного поведения решения. Поэтому получение опыта проведения физического анализа данного класса течений с использованием коммерческой программы, **безусловно, является актуальным.**

Научная новизна работы связана прежде всего с тем, что в работе впервые выполнено численное моделирование уникальных экспериментов М.А.Гольдфельда и др. в высокоэнтальпийной импульсной аэродинамической установке ИТ-302М ИТПМ СО РАН. Следует также отметить, что для валидации выбранной конфигурации расчета, помимо классических экспериментов Эванса, Шекснайдера и Бича (1978) и Бэрроуза и Куркова (1971), был также использован редко применяемый для валидации эксперимент Козна и Гайла (1969).

Результаты диссертации отражены в 14 публикациях в изданиях, рекомендованных ВАК (5 из списка ВАК и 9 из международных баз данных).

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (170 наименований).

Во **Введении**, помимо формальной части, дан обзор литературы, в котором дана оценка водорода как перспективного вида топлива, рассмотрена проблема стабилизации горения в высокоскоростном потоке и средства ее решения, указано на проблему организации эффективного смешения топлива с высокоскоростным потоком воздуха, отмечены проблемы, связанные с конечной скоростью химических реакций, рассмотрены способы учета взаимодействия турбулентности и горения и сделан вывод о том, что “представляет интерес дальнейшее исследование процессов смешения, воспламенения и стабилизации горения в турбулентных реагирующих потоках”.

В **Первой главе** описана математическая постановка задачи и конфигурация расчетов, задаваемая автором при запусках коммерческого пакета вычислительной аэродинамики ANSYS FLUENT. Для расчетов используется модель турбулентности SST – логичный выбор при отсутствии специальных настроек модели турбулентности на класс задач, т.к. среди базовых моделей турбулентности модель SST позволяет моделировать и свободную, и пристенную турбулентность и демонстрирует наиболее хорошие результаты при описании широкого класса течений. Среди многих моделей взаимодействия турбулентности с горением выбрана наиболее простая из физически обоснованных моделей – модель EDM. Рассмотрены доступные в программе FLUENT численные методы, и особое внимание уделяется методам, позволяющим вести расчеты нестационарных течений сжимаемого газа при наличии больших перепадов давления. Текст главы демонстрирует, что автор понимает свойства реализованных в коммерческой программе физико-математических моделей численных методов и выбирает ту их конфигурацию, которая соответствует физическим особенностям решаемых задач.

Во **Второй главе** представлены верификационные тесты для различных моделей кинетики горения водорода в воздухе и валидационные расчеты трех перечисленных выше экспериментов. Представлены результаты расчета задержек воспламенения для трех из шести рассмотренных в диссертации кинетических схем – с 16, 38 и 50 реакциями. Отдано предпочтение механизмам 38 и 50 реакциями, хотя и отмечено, что все рассмотренные механизмы дают заметные ошибки при $T < 1000$ К. Валидационные тесты проводились в двумерной постановке. При моделировании эксперимента Эванса, Шекснайдера и Бича влияние турбулентности на средние скорости реакций не учитывалось, а при моделировании двух других экспериментов тесты с моделью EDM показали малое влияние турбулентности на средние скорости реакций. Это согласуется с выводами, сделанными ранее в ЦАГИ (диссертация А.А.Ширяевой, 2018). Наилучшее согласование с экспериментальными данными Эванса, Шекснайдера и Бича получено при расчете на базе механизма с 38 реакциями в нестационарной постановке при возникновении в расчете вихревых возмущений по механизму Кельвина-Гельмгольца. Поэтому все последующие расчеты с горением автор проводит в нестационарной постановке. При моделировании эксперимента Бэрроуза и Куркова наилучшие результаты получены с использованием кинетического механизма Мааса с 37 реакциями. Этот результат согласуется с недавно полученными Р.А.Соломатиным (ИПМ им. М.В.Келдыша РАН) и И.В.Семеновым (НИИСИ РАН) данными о большой значимости кинетики в данном эксперименте. Качество согласования расчета с экспериментом у автора немного

хуже, чем у Р.А.Соломатина и И.В.Келдыша, что может быть объяснено отсутствием учета трехмерных эффектов. В расчетах эксперимента Козна и Гайла использован также механизм Мааса, и получено неплохое согласие с экспериментом. К сожалению, в диссертации не приведены поля течения, полученные при моделировании этого редкого эксперимента. Судя по тексту диссертации, нестационарные эффекты на конечном этапе расчетов обнаружены не были. Возможно, это связано с тем, что в эксперименте Козна и Гайла течение является всюду сверхзвуковым, и отсутствуют области дозвукового течения, которые могут создавать обратную связь для возникновения автоколебательных процессов (кроме застойных областей около обечаек, которые не взаимодействуют с областями горения).

В **третьей главе** приведены исследования высокоскоростных течений с горением в двумерной постановке. В первых двух разделах этой главы описаны численные эксперименты (при отсутствии обычных экспериментальных данных). Используется постановка эксперимента Козна и Гайла. В разделе 3.1 меняются параметры воздуха в затопленном пространстве, имитируя увеличение высоты полета. Показано, что увеличение нерасчетности струи с ростом высоты улучшает условия для горения и повышает полноту сгорания. Практическое применение подобного исследования может быть связано с использованием дополнительного впрыска топлива и горения в сопле высокоскоростного ЛА для снижения донного сопротивления на трансзвуковых режимах полета. В разделе 3.2 увеличивается влажность воздуха. Показано, что влажность воздуха может быть использована для управления стабилизацией горения в струе, причем оптимальное значение влажности воздуха лежит в диапазон 10-15%. В разделе 3.3 выполнено численное моделирование экспериментов в ИТПМ СО РАН с использованием электронного пучка для инициирования горения в канале с различными видами стабилизаторов (уступы, каверна) при втекании холодного потока воздуха с $M=4$. Воздействие электронного пучка моделировалось просто атомизацией всех молекул. Как и в эксперименте, атомизация приводила к воспламенению во всех случаях, но после этого возникшая область горения сносилась потоком. Частичной стабилизации горения удалось достигнуть лишь при использовании каверны.

В **четвертой главе** описано численное моделирование экспериментов с каналом, содержащим ступенчатое расширение, в импульсной трубе ИТПМ СО РАН. С учетом краткости эксперимента (60 мсек) стенки канала модели считались холодными, их температура полагалась равной 300 К. В процессе эксперимента давление и температура на входе в модель монотонно снижались. Однако оценки автора показали, что выполнить

трехмерный расчет с горением на протяжении всего физического времени эксперимента невозможно из-за ограниченности компьютерных ресурсов. Поэтому автор ограничился расчетами отдельных моментов эксперимента. Для каждого момента фиксировались параметры на входе в модель и проводился расчет в нестационарной постановке до получения стационарного решения, или выхода на квазипериодический режим, или запираания канала и выбивания горения ко входу в модель. Автор отмечает, что, несмотря на падение давления и температуры на входе в модель, структура течения и безразмерные профили давления в модели остаются неизменными. Но это тривиальное следствие запираания в критическом сечении сопла Лавалья, расположенного перед входом в экспериментальную модель. Факт неизменности невязкой структуры течения не обеспечивает квазистационарный характер его изменения (особенно учитывая перестройку течения в пограничных слоях и в рециркуляционной зоне), поэтому к полученным результатам следует относиться осторожно. Тем не менее, для случая инжекции водорода под углом 45 градусов автором получено неплохое согласование с экспериментом для трех этапов развития течения, наблюдаемых в эксперименте – локального воспламенения, распространения пламени и интенсивного горения. А для инжекции водорода перпендикулярно потоку получено запираание канала с выбиванием волны горения ко входу в экспериментальную модель, что согласуется с экспериментом.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертационной работы.

К диссертации есть несколько замечаний.

1. В диссертации много опечаток и неточных формулировок: “потенциал Ленарда-Джонсона”, “нормаль скорости”, “линеаризованные коэффициенты”, “поток сверхзвукового воздуха” и т.п. Начальный участок струи в ряде мест называется “ближним следом”. Имеются странные формулировки: “силы тела” и пр.
2. Волновая структура течения в эксперименте Бэрроуза-Куркова описана в диссертации некорректно. Волна разрежения не может отразиться от нижней стенки скачком уплотнения. Автору следовало подробно рассмотреть обтекание затупленной обечайки с образованием сначала двух волн разрежения, а затем двух скачков уплотнения при столкновении повернувшихся навстречу друг другу потоков.

3. К результатам диссертации, где в нестационарном RANS-расчете получено улучшение согласования с экспериментом за счет возникновения в расчете нестационарных вихревых структур типа неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, следует относиться осторожно, поскольку возникновение крупных вихрей свидетельствует от нарушении базовых гипотез RANS-модели течения (осреднение по всем масштабам турбулентных движений) – не говоря уже о том, что подобные нестационарные эффекты следовало бы рассматривать в трехмерной постановке. Улучшение согласования с экспериментом Эванса-Шекснайдера и Бича свидетельствует лишь о неприменимости базовой модели турбулентности к описанию начального участка струи (что является хорошо известным фактом – см., например, диссертацию А.И.Трошина, ЦАГИ, 2014). Автор, к сожалению, не отметил тот факт, что в моделировании эксперимента Бэрроуза и Куркова наилучшие результаты дал расчет, в котором вихревые структуры практически не развились.

Несмотря на эти замечания, результаты диссертации получены автором самостоятельно, имеют **научную ценность и обладают новизной**. Так, сама по себе демонстрация значимости нестационарных эффектов при описании горения важна и должна стимулировать дальнейшие исследования на базе подходов LES или SAS. Также автор показал, что коммерческий пакет ANSYS FLUENT может применяться для расчетного сопровождения экспериментальных исследований. Впрочем, следует рекомендовать вести такое сопровождение только специалистам с хорошим пониманием физики течений с горением и численных методов, чтобы в случаях некорректного поведения программы уточнить конфигурацию расчета или сделать вывод о необходимости использования собственных программных кодов. Необходимая для этого квалификация продемонстрирована автором в диссертации.

Результаты диссертации могут быть использованы в учебном процессе при чтении спецкурсов для студентов таких вузов, как НГУ, МФТИ, МАИ, СПбГУ и др.

Основные результаты диссертации О.В.Ваньковой дважды обсуждались в ЦАГИ – на видеосеминаре по аэромеханике ЦАГИ - ИТПМ СО РАН – НИИ механики МГУ – СПбГУ 24 мая 2022 г. и на видеосеминаре в Лаборатории физического и численного моделирования течений с турбулентностью и горением ЦАГИ 2 ноября 2022 г. в присутствии ведущего ученого в области высокоскоростного турбулентного горения проф. В.А.Сабельникова. Диссертация была оценена положительно, автору был дан ряд рекомендаций, которые ему следует учесть в дальнейшей работе.

Диссертация является законченным научным исследованием, выполненным на хорошем уровне и убедительно демонстрирующим квалификацию автора по указанной специальности. Работа полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, и «Изменений, которые вносятся в Положение о присуждении ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации №335 от 21 апреля 2016 года., а ее автор, Ванькова Ольга Сергеевна, несомненно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Начальник отделения
аэродинамики силовых установок ЦАГИ,
к.т.н., доцент

А.Ф.Чевагин

Отзыв подготовил:
Заместитель начальника лаборатории №14
отделения аэродинамики силовых установок ЦАГИ,
д.ф.-м.н., доцент

В.В. Власенко

Подписи А.Ф. Чевагина и В.В. Власенко заверяю:

Ученый секретарь

Диссертационного совета

31.1.006.01 (Д 403.004.01) ЦАГИ

доктор физико-математических наук, д
«30» декабря 2022 г.

Полное название организации: Федерал
аэрогидродинамический институт имен

М.А.Брутян
ение «Центральный
» (ФАУ «ЦАГИ»)

Почтовый адрес (с индексом) организации: 140180, Россия, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1

Телефон организации: 8 (495) 556-43-03

Адрес официального сайта организации в сети «Интернет»: <http://www.tsagi.ru>

Адрес электронной почты организации: info@tsagi.ru

Сведения о ведущей организации по диссертации
Ваньковой Ольги Сергеевны
"Математическое моделирование воспламенения и стабилизации горения
в предварительно не перемешанных водородно-воздушных потоках
при сверхзвуковых скоростях"
 по специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы
 на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Полное наименование организации в соответствии с уставом:	Федеральное автономное учреждение "Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского"
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом:	ФАУ «ЦАГИ»
Ведомственная принадлежность организации	Министерство промышленности и торговли РФ
Полное наименование структурного подразделения, составляющего отзыв:	лаборатории №14 отделения аэродинамики силовых установок ЦАГИ
Почтовый адрес организации:	ул. Жуковского, Московская область, г. Жуковский, 140180, Россия
Веб-сайт	http://www.tsagi.ru/
Телефон	8 (495) 556-43-03
Адрес электронной почты	info@tsagi.ru

Список основных публикаций работников структурного подразделения,
составляющего отзыв, в рецензируемых научных изданиях за последние пять лет по теме диссертации (не более 15 публикаций).

№	Авторы	Название	Издательство, журнал, год, №, страницы	Вид, год
1	Власенко В.В., Лю В., Молев С.С., Сабельников В.А.	Влияние условий теплообмена и химической кинетики на структуру течения в модельной камере сгорания ONERA LARCAT II	Горение и взрыв. Т. 13. № 2. С. 36-47	Статья, 2020
2	Сабельников В.А., Трошин А.И., Бахнэ С., Молев С.С., Власенко В.В.	Поиск определяющих физических факторов в валидационных расчетах экспериментальной модели ONERA LARCAT II с учетом шероховатости стенок канала	Горение и взрыв. Т. 14. № 4. С. 55-67	Статья, 2021
3	Власенко В.В., Ноздрачев А.Ю., Сабельников В.А., Ширяева А.А.	Анализ механизмов стабилизации турбулентного горения по данным расчетов с применением модели реактора частичного перемешивания	Горение и взрыв. Т. 12. № 1. С. 43-57	Статья, 2019
4	Lipatnikov A.N., Chakraborty N., Sabelnikov V.A.	Transport equations for reaction rate in laminar and turbulent premixed flames characterized by non-unity Lewis number	International Journal of Hydrogen Energy. Т. 43. № 45. С. 21060-21069.	Статья, 2018

5	Сабельников В.А., Власенко В.В., Молев С.С.	Анализ взаимодействия движущейся детонации с турбулентными пограничными слоями в канале на основе численного моделирования	Ученые записки ЦАГИ. Т. 51. № 6. С. 14-27.	Статья, 2020
6	Ivankin M., Nikolaev A., Sabelnikov V., Shiryayeva A., Talyzin V., Vlasenko V.	Complex numerical-experimental investigations of combustion in model high-speed combustor ducts	Acta Astronautica. Т. 158. С. 425-437.	Статья, 2019
7	Sabelnikov V.A., Vlasenko V.V.	Combustion in supersonic flows and scramjet combustion simulation	Energy, Environment, and Sustainability. С. 585-660.	Статья, 2018
8	Vlasenko V.V., Sabelnikov V.A., Molev S.S., Voloshchenko O.V., Ivankin M.A., Frolov S.M.	Transient combustion phenomena in high-speed flows in ducts	Shock Waves. Т. 30. № 3. С. 245-261.	Статья, 2020
9	Troshin A., Shiryayeva A., Vlasenko V., Sabelnikov V.	Large-eddy simulation of helium and argon supersonic jets in supersonic air co-flow	Springer Proceedings in Physics. 8th. Сер. "Progress in Turbulence VIII - Proceedings of the iTi Conference in Turbulence 2018" С. 253-258.	Статья, 2019
10	Ivankin M., Nikolaev A., Sabelnikov V., Shiryayeva A., Talyzin V., Vlasenko V.	Complex numerical-experimental investigations of combustion in model high-speed combustor ducts	Acta Astronautica. Т. 158. С. 425-437.	Статья, 2019

Заместитель Генерального директора
начальник Центра аэрогидродинамики
ФАУ "ЦАГИ"

С.В.Ляпунов

29.09.2022