

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
по науке

ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,

д.т.н., доцент



 Луковников
Александр Валерьевич
04 октября 2025 г.
М.П.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального автономного учреждения «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова») на диссертационную работу Бахнэ Сергея по теме: «Моделирование горения струй водорода в высокоскоростном ограниченном поперечном потоке горячего воздуха методом IDDES», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Бахнэ Сергея посвящена теме моделирования горения струй водорода в высокоскоростном ограниченном поперечном потоке горячего воздуха методом IDDES.

Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы из 227 наименований, общий объем составляет 201 страницу.

Во введении представлены общие сведения о проделанной работе, включая цели и задачи, обоснование актуальности, практической и теоретической значимости, научную новизну.

В главе 1 дан обзор литературы по тематике исследования, в который включены работы по численному и экспериментальному моделированию течений в высокоскоростных каналах с горением, обращено внимание на возникающие сложности при моделировании такого рода течений, рассмотрены различные механизмы стабилизации горения.

В главе 2 представлено построение метода численного решения для моделирования отрывного течения в высокоскоростном сжимаемом турбулентном потоке. Приведена математическая постановка задачи. Рассмотрены три тестовых случая, в которых присутствует отрыв с гладкой поверхности, по результатам которых для дальнейшего работы выбран и откалиброван численный метод на базе SST-IDDES.

В главе 3 в качестве объекта исследования выбран модельный проточный тракт экспериментальной установки ONERA, представляющий собой расширяющийся прямоугольный канал с поперечной инжекцией водорода, который служит тестовым случаем для исследований горения в высокоскоростном потоке. Полученное при помощи выбранного ранее вихреразрешающего метода IDDES решение сопоставлено с имеющимися экспериментальными данными по распределению давления на стенках и оптической визуализации. Описана сложная газодинамическая структура течения, состоящая из системы косых и прямых скачков уплотнения, отрывных зон перед инжекторами и зон возвратного течения, которые стабилизируют горение. Особое внимание уделено анализу влияния физических факторов, таких как шероховатость и температура стенок, учет стекол, вторичные токи и турбулентность на входе в канал.

В заключении обобщаются основные результаты работы.

Актуальность данной работы обусловлена тем, что детальное рассмотрение сложной турбулентной газодинамической структуры в высокоскоростном потоке с горением невозможно без разработки современных вихреразрешающих численных методов. Использование вихреразрешающих численных методов позволит обеспечить более точное определение газодинамических параметров для эффективного управления процессами смесеобразования, воспламенения и стабилизации пламен в высокоскоростных каналах.

Научная новизна работы заключается в разработке и верификации усовершенствованного вихреразрешающего подхода (IDDES) для

моделирования горения водорода, включая оригинальные методы согласования начальных условий, калибровки констант модели и модификации граничных условий для шероховатых стенок. Впервые для выбранного эксперимента установлен механизм стабилизации горения водорода в высокоскоростном потоке, определена роль теплового взаимодействия, шероховатости и других физических факторов, что вносит существенный вклад в понимание физики турбулентного горения в ограниченных потоках.

Практическая значимость исследования заключается в том, что разработанные численные методы и модификации реализованы в научном расчётном модуле zFlare, используемом в ЦАГИ, и применяются для моделирования высокоскоростных течений с горением в каналах.

Результаты работы могут быть использованы при описании сложной газодинамической структуры высокоэнтальпийных потоков в каналах энергетических установок для повышения эффективности и надёжности их работы.

Методология и метод исследования заключается в использовании подходов, основанных на решении уравнений гибридного метода RANS-LES с учётом протекающих в газе неравновесных химических реакций. Для численного решения осреднённых или отфильтрованных уравнений используется низкодиссипативный конечно-объёмный метод второго порядка аппроксимации по всем переменным. В некоторых разделах работы также используются одномерные модели для выявления особенностей численного метода. Исследование основано на численном моделировании современного эксперимента с использованием различных упрощающих предположений, сопоставлении и анализе полученных результатов.

Все результаты диссертации получены автором лично либо с его определяющим участием в постановке задач, выборе методов их решения и анализе результатов под руководством научного руководителя.

Результаты работы отражены в 12 научных статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК. Результаты докладывались автором на 17 научных конференциях.

Наряду с положительными результатами диссертационной работы можно выделить **некоторые замечания** и рекомендации, которые представлены ниже.

1. В обзоре литературы не упоминаются отечественные коллективы, использующие вихреразрешающие подходы. Не приведены известные RANS/LES методы.
2. Все модельные задачи рассмотрены для схемы WENO5 и ее различных версий в рамках расчетного модуля zFlare. Иногда в сочетании с центрально-разностной схемой. Однако, известны схемы WENO более высоких порядков. У них меньше схемная вязкость. Возможно в дальнейшем автору есть смысл их попробовать применить.
3. В работе [142] описывается новая схема семейства MP, которая обладает большей эффективностью по сравнению с WENO. Это продемонстрировано в статье. Упомянутой в диссертации схемы WENO5+MP в статье [142] нет. В диссертации также не приведено ее описание.
4. В явном виде не представлена оценка влияния фактора степени сжимаемости, влияние степени взаимодействия горения с турбулентностью и влияние химической кинетики на целевой результат.
5. Следует отметить, что используемые автором условия симметрии в задачах с вихреразрешающими методами решения требуют дополнительного подтверждения. Желательно показать на задаче в упрощенной постановке, например, с условиями периодичности на боковых границах и расчетной области меньшей ширины для экономии расчетной сетки, что использование условия симметрии в рассматриваемой задаче не оказывает значительного влияния на

результат. Также, в дальнейшем, представляется целесообразным более расширенно провести валидацию и верификацию используемого программного комплекса и применяемых автором математических моделей.

6. По тексту диссертации и автореферата присутствуют опечатки.

Заключение по диссертации:

Сделанные замечания не снижают актуальность и значимость полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы. Работа выполнена на высоком уровне, проведенные исследования являются научно-обоснованными и имеют практическую значимость в области расчетов и прогнозирования высокосубзвуковых течений в энергетических установках. Диссертация представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» (утв. Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 №842 (ред. от 25.01.2024)), предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы, а её автор, Бахнэ Сергей, заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв ведущей организации по диссертационной работе Бахнэ Сергея рассмотрен и одобрен на заседании секции НТС ИЦ 1000 от 18 сентября 2025 г. № 1000-32/12.

Заместитель генерального директора –
директор исследовательского центра
"Аэрокосмические двигатели и
химмотология",
ФАУ «ЦИАМ имени П.И. Баранова»,
доктор технических наук

Артыухин К. Ю.
« 4 » 10 2025 г.

Заместитель по науке директора Центра
информационных и суперкомпьютерных
технологий - начальник отдела
"Суперкомпьютерное моделирование"
ФАУ «ЦИАМ имени П.И. Баранова»,
доктор физико-математических наук

Любимов Д. А.
« 4 » 10 2025 г.

Научный руководитель по разработке
аэрокосмических двигателей,
ФАУ «ЦИАМ имени П.И. Баранова»,
кандидат технических наук

Прохоров А. Н.
« 4 » 10 2025 г.

Контактная информация:

Государственный научный центр, федеральное автономное учреждение
«Центральный институт авиационного моторостроения имени
П.И. Баранова».

Адрес: 111116, Москва, ул. Авиамоторная, д. 2.

Телефон: +7(499) 763-61-67.

Адрес электронной почты: info@ciam.ru.

Веб сайт: <https://www.ciam.ru>.