

ЗАДАУЛЫ АКЕРКЕ ЕРКИНОВНА

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО
ТЕЧЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ СО ВДУВОМ ВОЗМУЩЕННОЙ
СТРУИ**

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени
доктора философии (PhD) по специальности
6D074600 – «Космическая техника и технологии»

Общая характеристика работы. Данная работа посвящена численному моделированию турбулентного истечения возмущенной сверхзвуковой струи топлива в спутный сверхзвуковой поток воздуха для контроля впрыска струи в камеру сгорания и улучшения смешения топливно-окислительной смеси с целью фундаментального исследования в сфере задач аэромеханики.

Одной из важнейших задач в авиации является проектирование сверхзвуковых и гиперзвуковых летательных аппаратов с прямоточно-воздушными реактивными двигателями (ПВРД), где в качестве окислителя используется воздух. Центральной задачей таких двигателей является достижение полноты сгорания топлива, обеспечивающее необходимую тягу двигателя. Это достигается благодаря увеличению скорости смешения топливно-воздушной смеси.

Существуют разнообразные подходы улучшения смешения топлива с окислителем, как, например, уступы и каверны перед вдуваемой струей, уступы на верхних стенках камеры сгорания, которые помогают на входе получить развитый слой смешения между топливной струей и набегающим потоком воздуха. Также при моделировании такого течения применяются сопла различной формы. Однако упомянутые выше подходы увеличивают стоимость ПВРД, поскольку добавление новых деталей усложняет их геометрию и увеличивает стоимость.

Препятствием для улучшения смешения является физическая сложность исследуемых течений, поскольку, помимо трехмерности моделируемой турбулентности, рассматриваемые течения включают в себя систему взаимодействия ударных волн, а также широкий диапазон возникающих вихревых структур.

Дополнительной проблемой при формулировке численной модели с использованием LES моделирования (моделирование крупных вихрей) для рассматриваемых течений является также постановка граничных условий, способных генерировать анизотропную, неоднородную, трехмерную турбулентность, близкую к реальной.

В настоящее время одним из перспективных подходов улучшения смешения является использование дополнительного детерминистического возмущения, налагаемого на вдуваемую струю (вдув возмущенной струи).

Этот подход осуществляется путем амплитудно-частотного варьирования дополнительного воздействия на впрыскиваемую струю, тем самым обеспечивая контролируемый вдув топлива в камеру сгорания. Он хорошо исследован в дозвуковых струйных течениях, тогда как в сверхзвуковых и гиперзвуковых течениях проблема остается малоизученной.

Таким образом, вышеизложенное позволяет считать исследования, проводимые в данной работе, **актуальными** задачами в аэродинамике, в особенности при моделировании и прогнозировании трехмерных струйных сверх- и гиперзвуковых турбулентных течений в камерах сгорания, с целью улучшения смешения струи и потока.

Целью настоящей работы является: численное изучение механизмов улучшения интенсификации смешения вдуваемой сверхзвуковой сжимаемой неизобарической струи топлива в сверхзвуковой камере сгорания со спутным потоком воздуха с использованием нового подхода на основе осредненных по LES трехмерных уравнений Навье-Стокса для совершенного газа.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследования:**

- разработать численную модель и выполнить численное моделирование вдува изобарической сверхзвуковой сжимаемой струи в спутный поток с дополнительными усилениями на струе с целью улучшения смешения.

- осуществить численное моделирование вдува системы неизобарических (недорасширенных) сжимаемых сверхзвуковых возмущенных струй в спутный поток с целью выявления влияния основных параметров струи и потока на закономерности смешения, а также анализа воздействия дополнительного детерминистического возмущения на рост и формирование слоя смешения.

Объектом исследования является пространственное сверхзвуковое турбулентное течение со вдувом сверхзвуковых газовых струй в спутный сверхзвуковой поток.

Предметом исследования является численное моделирование турбулентного смешения газовой струи, вдуваемой в сверхзвуковой спутный воздушный поток с использованием LES модели турбулентности.

Научная новизна заключается в следующем:

- сформулирована численная модель пространственного сверхзвукового турбулентного течения струи совершенного газа, вдуваемой в высокоскоростной спутный поток, которая описывается трехмерными осредненными по пространству уравнениями Навье-Стокса, замкнутыми моделью Смагоринского, изложен алгоритм численного решения системы уравнений на основе ENO-схемы третьего порядка точности;

- предложен новый способ интенсификации смешения струи со спутным потоком путем введения дополнительного детерминистического возмущения на входе, вместе с этим определен диапазон частот и амплитуд детерминистически возмущённой струи, приводящих к улучшению смешения при расчетном режиме;

- установлены закономерности влияния степени нерасчетности и чисел Маха при численном моделировании системы недорасширенных сверхзвуковых струй в сверхзвуковом спутном потоке на механизм формирования ударно-волновой структуры и ее влияние на зону смещения;
- получены параметры детерминистического возмущения, приводящие к улучшению смещения системы струй со спутным потоком при нерасчетном режиме течения.

Научные положения, выносимые на защиту:

- численная модель трехмерного сверхзвукового турбулентного течения струи совершенного газа в спутном сверхзвуковом потоке;
- новый способ интенсификации смещения струи с потоком методом введения детерминистического возмущения на входе, апробированный путем анализа результатов численного моделирования проблемы вдува сверхзвуковой сжимаемой струи в спутный поток при расчетном режиме;
- результаты детального анализа системы неизобарических сверхзвуковых газовых струй с дополнительными усилениями, вдуваемых в спутный сверхзвуковой поток, исследование влияния возникающей ударно-волновой структуры на рост зоны смещения и формирование когерентных структур при помощи вариации параметра нерасчетности, чисел Маха струй и потока, а также частотной и амплитудной вариации детерминистического возмущения.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов диссертационной работы определяется использованием фундаментальных законов сохранения массы, количества движения, энергии, вещества при построении математических моделей; удовлетворительным согласованием численных результатов с экспериментальными данными и теоретическими работами других авторов.

Теоретическая и практическая значимость результатов.

Разработанные в данной работе численная модель и метод решения осредненных уравнений Навье-Стокса могут быть использованы для расчетов трехмерных сверхзвуковых турбулентных струйных течений, позволяющих прогнозировать поведение реальных трехмерных процессов, возникающих при смешении топлива и окислителя в камерах сгорания ПВРД и ВРД.

Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами. Данная работа выполнена в рамках проекта программы грантового финансирования фундаментальных исследований в области естественных наук «Численное моделирование пространственных турбулентных сжимаемых течений со вдувом струй и твердых частиц» (2018-2020 гг., №ГР 0118РК00461).

Личный вклад автора заключается в том, что все результаты, приведенные в данной работе, получены самим автором или при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке динамической модели задачи, а также самостоятельно произвел численные расчеты всех поставленных задач, включая верификацию поставленной математической и физической модели, провел тщательный и всесторонний анализ полученных

результатов и пришел к их теоретическому обоснованию при участии научного консультанта.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных научных конференциях: «Международная научная конференция студентов и молодых ученых ФАРАБИ ЭЛЕМИ» (Алматы, Казахстан, 10-12 апреля 2018 г.); «Традиционная международная апрельская математическая конференция, в честь Дня работников науки Республики Казахстан» (Алматы, Казахстан, 3-5 апреля 2019 г.); «V Международная научно-практическая конференция» (Чехия, Карловы Вары - Россия, Москва, 29-30 апреля 2020 г.), а также на научных семинарах: Института технической термодинамики Технологического университета Карлсруэ (2020 г., Карлсруэ, Германия); Механико-математического факультета КазНУ им. аль-Фараби (2018-2019 гг., Алматы); Института механики и машиностроения (2020 г., Алматы).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 2 публикации в научных изданиях, входящих в перечень рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК для публикации основных результатов научной деятельности; 2 публикации в рейтинговых научных изданиях, индексируемых Scopus и Thompson Reuters (импакт-фактор не менее $IF=0.40$); 3 публикации в материалах международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка использованных источников. Работа изложена на 130 страницах, содержит 36 рисунков, 8 таблиц.

Во введении отражены следующие моменты: актуальность, основные цели работы, новизна, научно-практическое значение диссертационной работы, степень ее разработанности.

Первая глава содержит в себе анализ исследований различных авторов по теме диссертационной работы. В ней содержится краткий обзор работ, посвященных исследованию методов моделирования турбулентности, анализ исследований (как экспериментальных, так и численных) вдува турбулентной струи в спутный поток с целью улучшения смешения при помощи наложения дополнительного детерминистического возмущения, также представлен обзор работ по численному моделированию вдува неизобарических сверхзвуковых струй, где также применяется введение дополнительных усилений для улучшения смешения.

Во второй главе осуществляется формулировка математической модели для поставленной проблемы. Исходной принята система осредненных трехмерных уравнений Навье-Стокса, замкнутых классической моделью Смагоринского. Производится процедура осреднения по плотности на примере уравнений неразрывности и Навье-Стокса в направлении x . Основная система приведена в безразмерной форме, где в качестве характерных значений приняты параметры сверхзвукового потока, а за наименьший масштаб длины взята начальная толщина потери импульса (толщина слоя

смещения) $\delta\theta$. Также в этой главе приводится алгоритм решения исходных уравнений с применением ENO-схемы высокого порядка.

В третьей главе формулируется численная модель на примере проблемы истечения сверхзвукового слоя смещения в спутный поток. Далее производится верификация поставленной численной модели путем сравнения полученных результатов с известными данными Samimiy et al. В результате численного эксперимента, проводимого в этой главе, были получены графики для осредненных турбулентных характеристик, которые сравнивались с данными эксперимента для пяти вычислительных сеток, вследствие чего было выявлено удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными, вместе с тем было подобрано оптимальное количество узлов для вычислительной сетки. Далее были получены графики для трехмерного энергетического турбулентного спектра, который продемонстрировал диапазон разрешаемых турбулентных вихрей для выбранной вычислительной сетки и при заданных размерах расчетной области.

В четвертой главе производится численное моделирование для проблемы вдува сверхзвуковой сжимаемой струи совершенного газа в спутный поток с добавлением дополнительного детерминистического возмущения. На входе формулируются начальные граничные условия для введения дополнительных усилений на струе, с целью изучения их влияния на формирование и рост слоя смещения. Вследствие проведенного численного моделирования были получены графики для различных параметров, для проблемы вдува струи с дополнительным возмущением в сравнении со случаем истечения струи без дополнительных усилений, с целью сравнения полученных результатов. Также производится анализ амплитудно-частотного варьирования детерминистического возмущения, вследствие чего, в качестве результата, приводятся рекомендации по выбору наилучших амплитуд и частот, приводящих к более интенсивному смещению струи со спутным потоком.

В пятой главе осуществляется ряд численных экспериментов для проблемы вдува системы неизобарических сверхзвуковых струй с дополнительными усилениями в сверхзвуковой спутный поток, в результате которых получены графики, демонстрирующие влияние возникающих ударно-волновых структур на зоны смещения между струями и спутным потоком, посредством вариации параметра нерасчетности. Проблемы истечения системы недорасширенных струй в спутный поток также исследуется при вариации чисел Маха струй и потока и амплитуд детерминистического возмущения, вследствие чего приводятся выводы по выбору наиболее оптимальных условий (параметров) для улучшения смещения между струями и спутным потоком.

В заключении приводятся основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.