# ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ ПРОФЕССОРА Н.Е.ЖУКОВСКОГО (ЦАГИ)

Лаборатория №14 Отделения аэродинамики силовых установок ЦАГИ «Исследования и разработки физических моделей и численных технологий описания режимов горения в двигателях летательных аппаратов»

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ ЛАБОРАТОРИИ В 2017 ГОДУ

7 декабря 2017 г., Технопарк ЦАГИ

Тезисы докладов



Жуковский 2017

# ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

- 11.00-11.10 В.А.Сабельников. Введение
- 11.10-11.45 **В.В.Власенко.** Обзор плана работ на 2017 г. Результаты предварительных расчетов модельной камеры
- 11.45-12.10 **Р.К.Курманов, В.А.Талызин.** Технические решения в модельной камере
- 12.10-12.35 <u>А.Н.Морозов</u>, М.А.Иванькин, В.И.Тулякова. Закупленное оборудование для измерений
- 12.35-13.00 Обсуждение

# ОБЕД 13.00-14.00

- 14.00-14.25 В.А.Сабельников, <u>В.В.Власенко</u>, А.А.Ширяева, А.Ю.Ноздрачев. Выбор модели PaSR на основе модельной задачи
- 14.25-14.55 **А.А.Ширяева.** Включение PaSR в программу для решения уравнений RANS и тестирование программы
- 14.55-15.10 **В.В.Власенко, А.А.Ширяева, Е.С.Матяш.** Построение библиотеки решения уравнений кинетики в процессе расчета
- 15.10-15.35 С. Бахнэ, С.В. Михайлов, <u>А.И. Трошин</u>. Программа для LES-расчетов и проведенные тесты

## 15.40-16.10 Кофе-брейк, обсуждение

- 16.10-16.35 **Левин В.А., <u>Журавская Т.А.</u>** Управление детонационным горением водородно-воздушной смеси
- 16.35-17.00 В.А. Левин, <u>И.С. Мануйлович</u>, В.В. Марков. Численное моделирование детонации в изогнутом канале круглого сечения и трехмерной вращающейся детонации в кольцевом зазоре
- 17.00-17.30 Обсуждение

## СОДЕРЖАНИЕ

В.А.Сабельников. Введение	3
В.В.Власенко. Результаты предварительных расчетов модельной камеры	.4
Р.К.Курманов, В.А.Талызин. Технические решения в модельной камере	.5
А.Н.Морозов, М.А.Иванькин, В.И.Тулякова. Закупленное оборудование для измерений	.7
В.А.Сабельников, В.В.Власенко, А.А.Ширяева, А.Ю.Ноздрачев. Выбор модели PaSR на основе модельной задачи	11
<i>А.А.Ширяева</i> . Включение PaSR в программу для решения уравнений RANS и тестирование программы	12
В.В.Власенко, А.А.Ширяева, Е.С.Матяш. Построение библиотеки решения уравнений кинетики в процессе расчета	16
С. Бахнэ, С.В. Михайлов, А.И. Трошин. Программа для LES-расчетов и проведенные тесты	19
Левин В.А., Журавская Т.А. Управление детонационным горением водородно-воздушной смеси2	22
В.А. Левин, И.С. Мануйлович, В.В. Марков. Численное моделирование детонации в изогнутом канале круглого сечения и трехмерной вращающейся детонации в кольцевом зазоре	24

#### введение

В 2016 г. Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е.Жуковского выиграл конкурс на получение мегагранта Правительства Российской Федерации. Деньги выделены для создания в ЦАГИ научной лаборатории под руководством приглашенного ведущего ученого. 18 июля 2017 года на базе Технопарка ЦАГИ была открыта лаборатория "Исследования и разработки физических моделей и численных технологий описания режимов горения в двигателях летательных аппаратов".

Лаборатория была создана при Отделении аэродинамики силовых установок (НИО-1 ЦАГИ) для разработки и валидации моделей различных режимов горения в воздушно-реактивных двигателях, а также создания специального программного обеспечения для использования в цикле аэродинамического проектирования силовых установок перспективных летательных аппаратов.

7 декабря 2017 г. в помещении лаборатории прошла научно-техническая конференция, посвященная подведению итогов первого года работы. В конференции, кроме членов коллектива лаборатории, приняли участие начальник НИО-1 ЦАГИ к.т.н. А.Ф.Чевагин и другие сотрудники НИО-1, которые оказывали содействие Лаборатории №14 в 2017 г. – специалисты по экспериментальным измерениям (к.ф.-м.н. А.Н.Морозов), по расчетным исследованиям (к.т.н. С.В.Матяш), представитель конструкторского отдела (Р.К.Курманов).

В докладах сотрудников лаборатории были представлены основные направления ее работы. Первое направление связано с разработкой моделей турбулентного горения и созданием на их основе программного обеспечения для расчета течений в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. В 2017 г. был произведен выбор подхода к моделированию турбулентного горения. Выбранная технология была включена в программу для численных расчетов трехмерных течений с горением. Проведено большое количество тестовых расчетов. Исследована возможность построения библиотеки решения уравнений кинетики в процессе расчета.

Для валидации разработанных численных технологий нужна специализированная база экспериментальных данных по горению в высокоскоростном потоке. Для получения таких данных в 2018-2019 гг. в аэродинамической трубе Т-131 ЦАГИ будут проведены испытания модельной камеры сгорания с детальными измерениями физической структуры и характеристик течения. На конференции был представлен разработанный проект этой камеры сгорания, обсуждались технологии планируемых измерений.

Еще одно направление работ связано с исследованием возможности создания двигателя с резонатором и непрерывно вращающейся детонацией. Группа исследователей под руководством академика В.А.Левина представила построенную ими численную модель течения в таком двигателе. Трехмерные расчеты выполнены на суперкомпьютере "Ломоносов" (МГУ).

Конференция показала, что в целом работа Лаборатории развивается успешно. Поставленные в 2017 г. задачи были выполнены на 90%. Обнаружены принципиальные недостатки выбранной базы экспериментальных данных по высокоскоростному турбулентному горению. В дальнейшем цикл валидации моделей турбулентности и горения будет выполнен заново с использованием других баз данных. Также к концу 2017 г. не удалось начать тестирование LES-версии программы **zFlare** применительно к задачам с горением, это будет сделано в 2018 г. Указанные отставания отчасти связаны с задержками поставок компьютерной техники, из-за которых пришлось скорректировать программу выполнения расчетных исследований. Для успешного проведения экспериментов на АДТ Т-131 ЦАГИ, которые начнутся осенью 2018 г., необходима серьезная подготовка, которая должна обеспечить установку модели и средств измерения на стенде с учетом его специфики, газификацию жидкого пропана и его смешение с водородом в строго контролируемых пропорциях до подачи в камеру сгорания, оптические измерения в требуемом спектральном диапазоне при использовании средств видеорегистрации, приобретенных в рамках финансовых ограничений Проекта.

#### Результаты предварительных расчетов модельной камеры

#### В.В.Власенко

В 2018-2019 гг. на аэродинамическом стенде Т-131 ЦАГИ предполагается провести серию экспериментальных исследований модельной высокоскоростной камеры сгорания на пропане. В результате испытаний должна быть получена база данных для валидации моделей турбулентного горения и программ для численного моделирования течений данного класса. Поэтому выбрана предельно простая геометрия камеры. Предполагается широкий спектр измерений, включая оптические методы. В 2017 г. подготовлен и запущен в производство проект модельной камеры, а также проведены предварительные параметрические расчеты в приближении 2.5-мерного течения для определения возможных режимов работы. Камера имеет прямоугольные сечения постоянной боковой ширины и включает два участка постоянной высоты H, между которыми расположен участок непрерывного расширения. Топливо подается с верхней и нижней стенок перпендикулярно потоку. Выбран следующий режим течения на входе в камеру: M = 2.5,  $T_0 = 2100$  K,  $p_0 = 10$  атм.

В расчетах показано, что при этих условиях самовоспламенения пропана не происходит, а при использовании пневмодросселя происходит срыв горения после выключения дросселя. Найдены схемы подачи топлива, обеспечивающие стабилизацию горения. При коэффициенте избытка окислителя α=1.5 для обеспечения горения пропана необходимо добавить около 15% водорода (по массе). При этом получается стационарное асимметричное течение с дозвуковым горением (рис. 1,а). Роль стабилизатора играет отрыв перед струей верхнего инжектора. Установлено, что отрыв может развиваться случайным образом либо у верхней, либо у нижней стенки канала, а при расчете половинки камеры реализуется квазистационарный режим горения со слабыми продольными колебаниями пламени. В дозвуковой зоне отрыва перед инжектором выделяется большая часть тепла. На втором участке постоянного сечения реализуется в среднем (по сечению) дозвуковое течение, хотя число Маха на оси симметрии остается сверхзвуковым. При α=3 для обеспечения горения пропана необходимо добавить около 30% водорода. В этом случае возникает стационарное симметричное течение с преимущественно сверхзвуковым горением (рис. 1,б). На рис. 1,в представлены продольные распределения статического давления по верхней стенке камеры в режимах без горения (до начала добавления водорода) и с горением. Виден противоположный характер влияния теплоподвода на участке *H*=*const*.



Рис. 1. Поля температуры для дозвукового (а) и сверхзвукового (б) режимов стабилизации горения и распределения температуры по верхней стенке камеры (в). Черные линии – α=1.5,
15% водорода, серые – α=3, 30% водорода, пунктирные – без горения, сплошные – с горением

#### Технические решения в модельной камере

# <u>Р.К.Курманов<sup>1</sup></u>, В.А.Талызин

<sup>1</sup> ФГУП "ЦАГИ", г. Жуковский

Геометрия камеры сгорания (рисунок 1) была спроектирована с учетом опыта по проведению исследований высокоскоростных камер сгорания в АДТ Т-131 ЦАГИ. Был выбран режим течения с параметрами торможения  $P_t = 1$  атм,  $T_t = 2100$  К и с числом Маха на входе в камеру M = 2.5. При этих условиях статическая температура в невязком ядре потока на входе в камеру близка к 1030 К. Камера представляет собой симметричный канал с прямоугольными поперечными сечениями и включает изолятор постоянной ширины длиной 0.3 м, участок с расширением канала (угол наклона верхней и нижней стенок – по 1°) длиной 0.6 м, участок постоянного сечения длиной 0.5 м и сверхзвуковое сопло длиной 0.4 м с углом наклона верхней и нижней стенок по 3°. Боковая ширина камеры постоянна и равна 0.1 м. Камера будет изготовлена из нержавеющей жаропрочной стали. Активного охлаждения стенок не будет. На боковых стенках камеры будут установлены 4 пары оптических окон из кварцевого стекла толщиной 0.05 м.

В качестве топлива был выбран пропан C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>. Он будет подаваться через две пары отверстий, расположенных в верхней и нижней стенках камеры перед концом изолятора, перпендикулярно стенкам (рисунок 15.1). В конце участка постоянного сечения перед началом сопла на нижней стенке будет установлен пневмодроссель.



Рисунок 1 - Эскиз геометрии модельной камеры сгорания и положения измерений. Длина в миллиметрах. Синие прямоугольники - положения оптических окон

Планируется широкий спектр измерений для регистрации физической картины течения: высокоскоростная шлирен-видеосъемка; визуализация излучения возбужденных радикалов OH; измерение температуры стенок термопарами, установленными внутри стенок камеры и на ее наружной поверхности; измерения как осредненных по времени значений давления, так и пульсаций давления.

В ЦАГИ была выполнена предварительная проработка возможных конструкторских решений для изготовления камеры сгорания. По имеющимся исходным данным, в частности, заданной геометрической характеристике проточной части, произведена разработка предварительной математической модели камеры сгорания – рис.2. Модель состоит из четырёх

оптических отсеков и соплового отсека. Первый отсек предназначен для подачи топлива (пропан, водород), остальные - для сверхзвукового горения.

Корпус каждого оптического отсека, представляет из себя монолитную деталь из стали марки 12Х18Н10Т, изготавливаемую электроэрозией. Проточная часть имеет прямоугольное сечение, с постоянной шириной и переменной высотой, в зависимости от расширения канала. В боковых стенках корпусов выполнены сквозные прямоугольные пазы для установки окон. Верхняя и нижняя стенка повторяют форму проточной части и служат для размещения штуцеров, датчиков и заглушек. К торцам корпусов привариваются фланцы из того же материала.

Каждый оптический отсек оснащен двумя термостойкими стеклами. Во всей камере применены всего два типоразмера стекол. При сборке отсеков, в пазы корпусов вставляются термостойкие прокладки марки Sigraflex. Прокладки служат для уплотнения стыков и исключения контакта стекла с корпусом. Фиксируются стекла крышками, равномерно обжатыми винтами с резьбой М8. Для отработки камеры вместо стекол используются металлические вставки-заглушки.

Верхняя и нижняя стенки отсеков оборудованы датчиками. Первый отсек характеризуется наличием датчиков пульсации, датчиков давления, датчиков температуры, инжекторов подачи топлива, пробок и заглушек. Остальные отсеки оснащены датчиками давления и датчиками температуры.

Помимо прочего, четвёртый отсек имеет конструктивную особенность - наличие пневмодросселя для подачи в камеру сжатого воздуха. Подача воздуха в камеру осуществляется через перфорацию в нижней стенке отсека.

Выход газов из камеры осуществляется через сопловой отсек. Давление на выходе из сопла не более 0,15 атм.

Герметичное соединение отсеков осуществляется девятью шпильками с резьбой М12. Места стыков отсеков надежно уплотняются медными прокладками.

Для бережного хранения и транспортировки для каждого отсека была спроектирована тара.

Подготовленная предварительная математическая модель камеры была передана выбранному изготовителю – ООО «ЦИД ОАО «НПО Энергомаш».



Рисунок 2 – Общий вид предварительной математической модели камеры сгорания

#### Закупленное оборудование для измерений

<u>А.Н.Морозов<sup>1</sup></u>, М.А.Иванькин, В.И.Тулякова <sup>1</sup> ФГУП "ЦАГИ", г. Жуковский

В рамках работы лаборатории физического и численного моделирования течений с горением в двигателях перспективных летательных аппаратов проводится разработка с последующей валидацией моделей различных режимов горения в ВРД с использованием модельной двухрежимной камеры сгорания с оптическими отсеками. Предполагается провести ряд оптических измерений, включающих панорамные методы визуализации [1]. Среди множества методов были выбраны методы регистрации хемилюминесценции реагирующих компонент потока, определение пространственного спектра течения по теневым изображениям и измерение полей температур с помощью пространственных пирометров (тепловизоров) и набора распределенных по поверхности исследуемой модели термопар. Для корректного восприятия результатов панорамных измерений применяются разработанные в ЦАГИ системы повышения информативности и комфорта при зрительном контроле двумерных данных визуализации.

Рассмотрим потоковую регистрацию излучения в видимом, ближнем УФ и ближнем ИК диапазонах. Исследование спектра излучения в видимом диапазоне позволяет определять температуру потока, в ближнем ИК – наличие свободного водорода по соответствующим линиям и хемилюминесценцию сложных органических компонент, в ближнем УФ – хемилюминесценцию возбужденного радикала ОН, которая позволяет определить положение областей тепловыделения [2-3]. Развитие процесса горения сопровождается появлением люминесцентного излучения радикалов ОН, возбуждаемых за счет переноса энергии к ним от продуктов химических реакций процесса горения. Яркость такого излучения сильно зависит от концентраций компонент реакций, при которых образуется возбужденный радикал ОН. Исследование пространственного распределения интенсивности хемилюминесценции позволяет, учитывая вид экзотермических реакций окисления горючего, уточнить химическую кинетику процесса.

При регистрации излучения используется полоса 0-0 системы  $A^2\Sigma^+$  -  $X^2\Pi$  возбужденного радикала ОН в диапазоне 280-350 нм (начало полосы 306 нм) и максимумом в области 307-315 нм. Разработана панорамная видеосистема регистрации данного типа излучения. Для спектральной селекции и отстройки от теплового излучения применены фильтры, позволяющие выделить область излучения с длинами волн 305-330 нм. Особенностью коротковолновых фильтров является их пропускание ближнего ИК излучения, что вместе с высокой чувствительностью матриц в этой области и сильного сигнала теплового излучения, создает сильные помехи, во много раз превышающие полезный сигнал. Решением является применение многослойных интерференционных фильтров с широкой полосой пропускания и резкими зонами подавления сигнала. Для формирования изображения используются ультрафиолетовые кварцевые объективы. Регистрация сигнала производится с помощью двух типов камер – высокого разрешения с потоковой передачей видео и скоростной камерой с глобальным затвором. Камеры высокого общую разрешения внедрены в сеть промышленного наблюдения посредством специализированного видеосервера, а камера с глобальным затвором - по интерфейсу GigVision. Для настройки систем видеорегистрации применяются обычные бытовые ртутные УФ-облучатели.

В данной работе представлена схемотехника системы панорамной регистрации сигнала хемилюминесценции возбужденного радикала ОН, основными компонентами которой являются: механическая система сопряжения с исследуемой камерой сгорания, оптическая система, регистрирующее устройство с аппаратным устройством записи данных включающая специализированные УФ камеру и регистратор, компоненты для настройки, звуковой канал синхронизации, видеосервер для сопряжения с системой промышленного наблюдения, компьютерная система управления и записи данных, дисплей мониторинга процесса в реальном времени и система обработки потоковых данных. Применен унифицированный подход по типу используемых составных компонент и интерфейсам передачи данных, что позволяет обеспечить

совместимость и взаимозаменяемость компонент и оперативно переходить с одной схемы регистрации на другую.

Разработанная схемотехника системы определяет компоненты оборудования для данного вида измерения, которые необходимо приобрести. На основе вышеизложенного составлено соответствующее техническое задание на проведение закупки компонент измерительной системы.

Большое распространение для исследования пространственного спектра течения получили теневые приборы (приборы Теплера). Наблюдение в реальном времени раньше проводилось посредством оптического канала на матовом экране или с помощью окуляра. Регистрация данных проводилась с помощью различных средств фото- и видеозаписывающих систем. Сложность и размеры систем сильно варьировались, но одно оставалось неизменным – обработка фотоматериалов в так называемой темной комнате.

С появлением электронно-оптических средств матричной регистрации, они сразу нашли применение в теневых приборах. Но только в последнее время, с появлением доступных средств видеорегистрации на относительно больших матрицах (сантиметры в размере, или то, что называется FullFrame – стандартный 35мм фотокадр 36х24мм) появилась возможность получать изображения приемлемого качества.

Приемлемое качество означает высокое разрешение, и широкий динамический диапазон – (аналог широты оптической плотности почернения). Этому способствуют и появившиеся высокоскоростные средства записи на твердотельных носителях. Современные носители позволяют записывать непрерывно сигнал разрешением до 4096х2160 при скорости 60 кадров в секунду и глубине в 10-14 бит без сжатия. Появляется возможность регистрировать более высокие скорости процессов при использовании специализированных кодеков для сжатия или оперативной памяти в качестве временного хранилища данных.

Рассматривается опыт применения матричных фото- и видеокамер для видеорегистрации картины обтекания, получаемой с помощью теневого прибора, за последние 15 лет. Показаны системы современного телевизионного контроля, построенные на низкобюджетных компонентах, которые обеспечивают необходимое качество настройки [4], визуализации в реальном времени и записи данных [5].

Система состоит из следующих компонент:

- механическая система сопряжения с теневым прибором (штативы, подвижки и пр.);

- оптическая система сопряжения с теневым прибором (объективы, конвертеры, держатели);

- регистрирующее устройство с аппаратным устройством записи данных (фото- или видеокамера и, возможно, отдельный аппаратный регистратор);

- компоненты для настройки теневого прибора и регистрирующего прибора (функциональный мобильный монитор);

- система звуковой синхронизации (ввод голоса оператора стенда и руководителя испытаний);

- компьютерная система записи данных (компьютер с встроенной или внешней системой преобразования и записи сигнала);

- система отображения (обычно большой монитор или телевизор).

В данной системе применен ряд умолчаний по типу используемых составных компонент, что позволяет обеспечить некоторую совместимость и взаимозаменяемость компонент. Это относится как к оптической, так и к электронной составляющим. Показано, что принципы построения данных систем подходят к построению видеосистем высокоскоростной регистрации (до 20 тыс. кадров в секунду и 20 нс длительности экспозиции), основанных на высокоскоростных камерах с регистрацией данных в оперативной памяти. Взаимозаменяемость и дополнение компонент позволяют быстро перейти в эксперименте с одной схемы регистрации на другую.

Аналогично системе визуализации хемилюминесценции, разработанная схемотехника системы определяет компоненты оборудования для данного вида измерения, которые необходимо приобрести. На основе вышеизложенного составлено соответствующее техническое задание на проведение закупки компонент измерительной системы регистрации последовательности теневых изображений.

В задачах теплового аэрофизического эксперимента визуальный контроль тепловых процессов и состояния стенда является насущной проблемой. Для визуализации обтекания моделей и элементов ЛА высокотемпературным потоком используется инфракрасная визуализация с помощью соответствующих камер с матрицами, имеющими максимум чувствительности в рабочем диапазоне температур. Это соответствует, по закону Вина, длине волны в 10 мкм при 300К, 3 мкм при 1000К и 1 мкм при 3000К. Исследование переходных процессов диктует необходимость применения инфракрасных камер, перекрывающих, по возможности, весь исследуемый диапазон температур.

Применение ряда камер, с перекрывающимися по длинам волн диапазонами, приводит к построению комплексной многоканальной и многоуровневой визуализации. Иерархичность представления и обработки данных способствует выделению элементов изображения, соответствующих заданному режиму обтекания. Получение такой информации в реальном времени проведения эксперимента позволяет, даже на небольших временных отрезках, получать информацию, достаточную для управления процессом или изменения его хода, посредством изменения руководящих параметров технологического процесса [6].

Использование инфракрасных камер позволяет одновременно решать задачу полномасштабного видеонаблюдения всего высокотемпературного стенда, его элементов и рабочего персонала. На длинах волн 8-14 мкм хорошо различимы люди на фоне остального оборудования по их интенсивному тепловому излучению. Комплексная мультиспектральная видеорегистрация позволяет выделять и идентифицировать все элементы наблюдаемой сцены [7] и одномоментно диагностировать наличие не только нагретых участков, но и наличие воды или утечки газа. Для задач видеонаблюдения широко используется мультиспектральная инфракрасная подсветка. На длинах волн 0.85 мкм, 0.94 мкм и 1.06 мкм применяются сверхъяркие светодиоды и галогеновые лампы с ИК-фильтрами. На длинах волн 2-5 мкм используется глобар, а на длинах волн 5-15 мкм - штифт Нернста совместно с ИК-фильтрами на соответствующие длины волн.

Интересно, что все эти источники не видны человеческому глазу, и, следовательно, не создают так называемого светового загрязнения среды. Для персонала создаётся независимое освещение и подсветка локальных участков. Ничто не мешает, при этом, использовать для видеонаблюдения и камеры видимого диапазона. Более того, по разнице изображения на видимой и ИК камерах можно оценивать степень задымлённости или наличия тумана.

Показано, что применение инфракрасных камер широкого диапазона длин волн для задач видеонаблюдения и визуализации позволяет использовать для этих целей одни и те же элементы и алгоритмы [8]. Составлено техническое задание для закупки оборудования.

С целью повышения информативности и комфорта при зрительном контроле двумерных данных визуализации были приобретены компонеты для соответствующих оптического устройства. Данное устройство относится к области когнитивного восприятия и является оптическим средством, обеспечивающим объемное восприятие плоских изображений, при отсутствии бинокулярной диспарантности. Устройство для объемного восприятия плоского изображения, расположенное между глазом наблюдателя и изображением, содержит две оптические низкодисперсные призмы, основаниями друг к другу, и светофильтры, пропускающие видимое излучение и подавляющие ближнее инфракрасное излучение начиная с длинноволновой части видимого диапазона [9].

В докладе рассмотрен опыт построения системы видеорегистрации для наблюдения, регистрации и визуализации ряда процессов, связанных с обтеканием моделей ЛА или их элементов на высокоскоростных аэродинамических стендах. Показаны общие элементы данных систем. Приведен ряд современных аппаратных и программных компонент таких систем, которые позволяют проводить как визуализацию, так и измерения. Определен набор программных компонент для видеограмметрии нестационарных явлений – помпажного режима обтекания модели двигателя ЛА. Определены основные принципы построения технических заданий на приобретение компонент измерительных систем.

Как видно из работы, системы имеют универсальные принципы построения и применения и могут использоваться для видеорегистрации различных технологических процессов, что и было отмечено во введении.

За рамками доклада осталось применение комплекса для многомерной иерархической визуализации, мультиспектральной визуализации и термовизионных измерений. Отмечено, что построение подобных комплексов проводится на той же элементной аппаратно-программной базе.

Данные системы применяются достаточно широко для регистрации обтекания моделей ЛА и их элементов на различных стендах, включая стенды с моделированием процессов горения, и аэробаллистических трассах.

Дальнейшее развитие данного подхода, связано с тем, что в настоящее время увеличиваются сложность и многообразие решаемых задач. Увеличивается, в свою очередь сложность систем регистрации, модернизируются компоненты измерительных систем. Поэтому происходит непрерывное обновление и модификация применяемых аппаратных средств видеорегистрации.

- 1. В. Власенко, О. Волощенко, В. Сабельников, В. Талызин, Выбор геометрии и режимов работы экспериментальной двухрежимной высокоскоростной камеры сгорания на пропане (в печати).
- 2. D. J. Micka, "Combustion stabilization, structure, and spreading in a laboratory dual-mode scramjet combustor," Doctoral dissertation, University of Michigan, 2010.
- 3. H. N. Najm, P. H. Paul, C. J. Mueller, and P. S. Wyckoff, Combustion and flame 113(3), 312-332, 1998.
- 4. Levin A., Fergus R., Durand F., Freeman W.T. Image and depth from a conventional camera with a coded aperture. ACM Transactions on Graphics, 2007, vol. 26, no. 3, 2007, art. no. 1276464. DOI: 10.1145/1276377.1276464.
- 5. Морозов А.Н., Фильтрация изображения, управление динамическим диапазоном и деталировкой отображения, Свидетельство №2008614810 (7 окт. 2008 г.) (MC-F5DFilter)
- 6. Морозов А.Н. Многоуровневая визуализация сетей передачи данных организации и управления воздушным движением. // Вестник транспорта №8, 2006, стр.24-29.
- 7. Кузьмин В П, Корнышев Н П, Никитин Н С, Челпанов В И Телевизионные системы для визуализации газоразрядного свечения // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания -2006 № 2 - С 44-45
- 8. Мошаров В. Е., Радченко В. Н., Сенюев И. В. Пирометрия с использованием п.з.с. камер. //Приборы и техника эксперимента, 2013, № 4, с. 132–137
- 9. Антипов В.Н., Щербаков В.С., Чугунов А.В. Экспериментально-физический подход в методике развития интуиции синергетически-когнитивной образно- структурированной зрительной системы // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. естест. науки. 2009. –Т.151, кн.1. С.188–195

#### Выбор модели PaSR на основе модельной задачи

## В.А.Сабельников, <u>В.В.Власенко</u>, А.А.Ширяева, А.Ю.Ноздрачев<sup>1</sup>

# <sup>1</sup> ФАЛТ МФТИ, г. Жуковский

Главной трудностью при численном моделировании турбулентного горения является необходимость описания процессов смешения и горения, протекающих на уровне мельчайших турбулентных вихрей. В моделях частично перемешаннного реактора (Partially Stirred Reactor, PaSR) делается предположение, что каждая ячейка расчетной сетки включает "тонкие структуры", в которых протекает горение и которые обмениваются смесью и теплом с окружающим газом. Самая известная модель этого класса – Eddy Dissipation Concept Магнуссена (EDC).

Была рассмотрена модельная задача о горении в замкнутой емкости, состоящей из одной расчетной ячейки. Тогда модель PaSR сводится к модели двух взаимодействующих гомогенных реакторов, сумма объемов которых равна объему расчетной ячейки. Относительный объем "тонких структур"  $\gamma^*$  может зависеть от характеристик турбулентности и химической кинетики. В модели EDC предполагается, что процессы в "тонких структурах" развиваются квазистационарно, но есть варианты модели PaSR, где процессы в обоих реакторах развиваются одновременно и описываются сходными уравнениями. Есть варианты модели PaSR, где принимается, что давление или плотность постоянны по ячейке.

Для выбора подхода к описанию турбулентного горения были запрограммированы различные варианты модели PaSR и были проведены параметрические расчеты с разными значениями параметра  $\gamma^*$ . На рис.1,2 представлены типичные результаты, полученные для случая  $\gamma^*=0.1$ . Черными линиями показано изменение средней по ячейке температуры, серыми – изменение температуры в "тонких структурах". На рис.1 сплошными линиями показан случай, когда процессы в реакторах идут одновременно, а пунктиром - когда "тонкие структуры" квазистационарны. Видно, что квазистационарная модель дает неплохое описание развития процесса, за исключением начального этапа развития горения в "тонких структурах". Установлено, что для обеспечения устойчивости счета необходимо считать, что в пространстве, окружающем "тонкие структуры", химических реакций нет. Рис.2 показывает, что предположения о постоянстве давления (сплошные линии) и плотности (пунктир) приводят к разному развитию процессов в ячейке. При постоянном давлении часть выделяющегося тепла тратится на работу сил давления, поэтому температура ниже.



"тонких структур"

# Включение PaSR в программу для решения уравнений RANS и тестирование программы

А.Ширяева

Целью работы является модификация и верификация имеющихся компьютерных программ для описания течений смеси идеальных сжимаемых газов с переменными теплоемкостями и неравновесными химическими реакциями. В качестве такой программы выбран расчетный модуль *zFlare* из пакета прикладных программ *EWT-ЦАГИ* [1]. Эта задача включает в себя: выбор модели турбулентности и химической кинетики для расчетов высокоскоростных камер сгорания; реализацию в программе различных методов описания турбулентного горения и выбранной модели турбулентности; разработку, внедрение в программу и настройку модели для учета взаимодействия турбулентности и горения (*TCI*). В работе содержится описание доработок расчетного модуля и результатов его верификации.

В программу внедрены три модели кинетики горения водорода в воздухе: Моретти [2], ONERA [3], Fureby [4]. По результатам тестирования первая модель была признана непригодной из-за неверной оценки периода задержки воспламенения. Две другие модели значительно новее и в рассматриваемом диапазоне температур показали сходные результаты. Реализованы и тестированы две двухпараметрические модели турбулентности, основанные на гипотезе Буссинеска: (q- $\omega$ ) Коукли [5-8] и (k- $\omega$ ) SST Ментера [9]. В представленных расчетах использовалась также модифицированная модель SST, для которой были адаптированы некоторые результаты диссертации [10]. Эти модификации направлены на уточнение описания турбулентных струй, в том числе длины начального участка, поперечных профилей скорости и кинетической энергии турбулентности.

Кроме того, внедрен и находится на этапе разработки метод для учета взаимодействия турбулентности и горения (TCI). В настоящей работе для описания TCI выбран подход, основанный на методах типа Eddy Dissipation Concept Model (EDC, Магнуссен [11-12]). и Partially Stirred Reactor model (PaSR, [13]). Модель EDC строится на представлении турбулентности в виде каскада вихрей и на предположении, что при высоких числах Рейнольдса химические реакции протекают в основном в тонких структурах, связанных с мельчайшими турбулентными вихрями. Эти структуры расположены в пространстве неравномерно и их объем  $\gamma^*$  составляет некоторую долю от всего объема, занимаемого газом

Первые результаты, полученные с использованием метода EDC, реализованого в комплексе программ zFlare, привели к отсутствию горения в расчетах. Это незагорание можно объяснить очень малыми величинами параметра  $\gamma^*$ , наблюдаемыми в расчете. Это, в свою очередь, приводит к слишком малым средним значениям источниковых членов для реагирующих компонент газовой смеси, пропорциональных  $\gamma^*$ :  $\bar{S}_i = \gamma^* S_i^*$  и, как следствие, не загоранию. Следует отметить, что модель EDC Магнуссена была разработана и применяется, главным образом, для дозвуковых течений. Модификацией для корректной работы в высокоскоростных течениях стала модель PaSR ([13]). Отличие от модели EDC, главным образом, заключается в определении основных величин модели – объемной доли тонких структур  $\gamma^*$  и характерного времени пребывания в реакторе  $\tau^*$ . В PaSR уже нет ограниченности в зависимости  $\gamma^*$  только от параметров турбулентности, а  $\tau^*$  только от микромасштаба турбулентности.

Для валидации моделей также необходим анализ экспериментальных данных и подготовка тестов. Сопоставление расчетов тестовых задач в рамках подхода RANS выполняется с открытыми базами данных по турбулентному горению. Для верификации программы ввиду кажущейся простоты и большого количества экспериментальных данных были выбраны эксперименты Evans et al. [14-15]. В эксперименте [15] исследовалось горение водорода в круглой

сверхзвуковой струе, истекающей в спутный сверхзвуковой поток воздуха, содержащего водяной пар. В эксперименте проводились замеры концентраций всех молекул (H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>) в ряде поперечных сечений. По данной тестовой задаче имеются данные расчетов других авторов с использованием различных моделей химической кинетики и турбулентности (к примеру, [15-18]) данные широко используются для валидации CFD программ до сих пор. В этих экспериментах делались замеры давления трубкой Пито и заборы образцов газа с последующим замером концентраций в них. Подробный анализ экспериментальных данных [14-15] и множественные параметрические расчеты показали непригодность этого эксперимента для качественной валидации. Одной из возможных причин является неточность при определении концентрации методом взятия проб. В эксперименте это осуществлялось контактным методом насадкой типа трубки Пито. При этом, помимо возмущений в потоке, надо иметь в виду, что перед насадкой возникает скачок уплотнения, который повышает температуру за ним, таким образом температура в пробном материале выше той, которая была бы в этом месте в потоке без него. Кроме того, для точного определения концентраций необходимо моментально проводить анализ. Иначе, в случае промедления, реакция успевает протечь дальше вплоть до равновесия. Тогда определенный состав уже будет отличаться от забранного в сторону увеличения продукта реакции. Это очень актуально в условиях эксперимента с высокой температурой в зоне горения. Возможно именно эти ошибки эксперимента мы наблюдаем в [15]. Опыт авторов иных расчетных работ подтверждает сделанные выводы. Почти ни в одной работе, за исключением нескольких работ ([15-18]), не приводятся данные, полученные по распределениям давления Пито. Это наводит на вывод о том, что авторам других работ также не удавалось получить удовлетворительного соответствия с экспериментом и, как следствие, о возможном несоответствии данных, полученных в эксперименте.

Приводятся результаты моделирования эксперимента без учета TCI, а также применения методов EDC и PaSR в zFlare к расчетам эксперимента [15]. Также рассмотрено моделирование течения [14] без горения. Автором настоящего отчета был предпринят ряд попыток добиться удовлетворительного согласования с экспериментальными данными [15]. Сначала рассматривалась только часть экспериментальной области, ограниченная сверху r/d=2 и начинающаяся с сечения x/d=0.33. Таким образом, взаимодействие с окружающим пространством не принимается во внимание. Надо отметить, что во многих расчетных работах ограничиваются тем же подходом. На входе в расчетную область были заданы профили параметров из [5]

Применение реализации метода *PaSR* в *zFlare* к моделированию эксперимента [15] привело к результатам, практически не отличающимся от результатов, полученных без учета взаимодействия турбулентности и горения. Это объясняется слишком большими величинами объемной доли реактора  $\gamma^*$ , получаемым в расчете ( $\gamma^* > 0.8$  в зоне горения). По мнению авторов, завышение значения параметра  $\gamma^*$  связано с некорректным определением характерного времени химических процессов  $\tau_{xum}$ . Дальнейшие усилия будут направлены на модификацию выражения для  $\tau_{xum}$ . Необходимо, кроме характерного времени ламинарного пламени, учесть также и время задержки воспламенения  $\tau_{und}$ . Кроме того, необходимо определить характер химических процессов и выбрать определяющее локально  $\tau_{xum}$ .

Для понимания действия модели *PaSR* были проведены расчеты с параметром  $\gamma^*$ , фиксированным во всем поле на протяжении всего расчета. Результаты этих расчетов показали, что при  $\gamma^* \rightarrow 1$  результаты действительно приближаются к расчетам без учета взаимодействия турбулентности и горения, а при  $\gamma^* \to 0$  - к расчету с выключенными химическими реакциями. Таким образом, применение модели *PaSR* приводит к уменьшению интенсивность протекающих химических реакций относительно расчета без ТСІ. Однако стало очевидно, что учет взаимолействия турбулентности И горения не может позволить приблизиться к экспериментальным данным по положению максимума концентраций и по иным характерным чертам поведения экспериментальных данных. Поэтому возникла необходимость исследовать влияние начального профиля и иных эффектов на результаты.

На первом этапе был проведен ряд расчетов с модификациями во втекающем профиле, заданном в сечении x/d=0.33. Эти модификации включили как параметры турбулентности, так и различные газодинамические параметры (давление, скорость, температура). Также было рассмотрено влияние турбулентных чисел Шмидта и Прандтля, две методики расчета турбулентного числа Маха в поправке Дэша для учета эффектов сжимаемости турбулентности. Кроме того, было рассмотрено несколько моделей химической кинетики: Moretti, ONERA, Fureby и моделей турбулентности ((q- $\omega$ ) и SST). Но никакие модификации не позволили приблизиться к экспериментальным данным, поэтому дальнейшие попытки были связаны с моделированием течения до сечения x/d=0.33, а также и далее в сопле для топлива и во внешнем сопле окислителя до сечения среза сопла.

Далее была построена более подробная сетка, позволяющая более корректно описать рециркуляционную зону за уступом между внутренним и внешним контурами. Новая сетка содержит около 80000 ячеек, по 20 ячеек в ПС, 40 ячеек на высоту уступа, в расчетах использовался "закон стенки", так что в первой ячейке у стенки у+ ~10. Таким образом, расчет на новой сетке начинался с сечения среза сопла x/d=0, сверху к расчетной области примыкает буферный блок, на верхней границе заданы параметры окружающего покоящегося воздуха, на левой границе буферного блока задано условие твердой стенки без прилипания, справа задан снос параметров, слева в основном блоке – задан втекающий профиль из сопла топлива снизу, из внешнего сопла сверху и стенка без прилипания между ними.

В качестве первой попытки задать втекающий профиль была рассмотрена методика, применяемая в [19] и подробно описанная в [20-21]. Однако это не привело к заметному приближению к экспериментальным данным. Поэтому дальнейшие усилия были направлены на моделирование течения в сопле топлива и окислителя. К сожалению, в отчете [15] не указано деталей относительно геометрии сопел, только сказано, что сопло водорода расположено на конце трубки и имеет угол полураствора в 5 градусов. Столь скудные данные оставляют большой произвол в возможных геометриях для рассмотрения. Первая попытка заключалась в моделировании течения в некоторых соплах типа Лаваля, геометрия которых была взята из предыдущих, не относящихся к настоящей работе, расчетов авторов и отмасштабирована на указанные числа Маха.

Однако толщина пограничного слоя в струе топлива оказалась очень мала по сравнению с экспериментальной, которую можно оценить по профилю давления Пито в сечении x/d=0, поэтому были предприняты попытки найти геометрию, которая давала бы большую толщину ПС. Для этого были рассмотрены сперва геометрии с трубкой разной длины перед соплом для водорода (т.к. в [15] сказано, что сопло расположено на конце трубки). Однако, длина трубки перед соплом, как и предполагалось, не влияет на толщину ПС на срезе сопла, и таким образом добиться увеличения ПС невозможно. Поэтому далее была рассмотрена геометрия с трубкой после сопла для H2.

Для того, чтобы обеспечить угол полураствора в 5<sup>0</sup>, была рассмотрено несколько геометрий с трубкой, переходящей в коническое сопло с нужным углом, различающиеся длиной конической части и, соответственно, толщиной ПС на выходе, несколько геометрий мерной шайбы вместо сопла для H2. В ряде расчетов была получена неустойчивость, которую удалось устранить, задавая горячий воздух снаружи вместо холодного либо воздух с повышенной турбулентной вязкостью. При этом на устойчивых режимах было показано, что влияние температуры и величины турбулентной вязкости воздуха снаружи небольшое. В целом никакие из рассмотренных модификаций не позволили заметно приблизиться к эксперименту по распределениям концентрации инертной примеси и давления Пито одновременно. Поэтому было принято решение сначала рассмотреть течение подобного класса без горения и настроить модель турбулентности на холодном течении. Для этого выбраны эксперименты Cutler et al. [22-23]. После этого настроенная программа будет применяться к моделированию течений с горением – эксперименты Cheng et al. [24].

- 1. Енгулатова М.Ф., Кажан Е.В., Матяш С.В. Промышленные солверы пакета ЕWT-ЦАГИ и их тестирование на стандартных тестах.
- 2. Moretti G. A new technique for the numerical analysis of nonequilibrium flows. AIAA Journal, Vol.3, №2, 1965.
- 3. D.M. Davidenko, I.Gökalp et al. AIAA 2006-7913
- 4. A. Vincent-Randonnier, A. Ristori, V. Sabelnikov, N. Zettervall, C. Fureby. An Experimental and Computational Study of Hydrogen-Air Combustion in the LAPCAT II Supersonic Combustor.
- 5. Coakley T.J. Turbulence modeling methods for the compressible Navier-Stokes equations.AIAA-83-1693, 1983
- 6. Coakley T., Hsieh T. Comparison between implicit and hybrid methods for the calculation of steady and unsteady inlet flows. AIAA-85-1125, 1985
- 7. В.В.Власенко, С.В.Матяш, С.В.Михайлов. Инженерная модификация (q-ω)-модели турбулентности. Материалы XX юбилейной школы-семинара "Аэродинамика летательных аппаратов", ЦАГИ, п.Володарского, 2009
- 8. Dash S., Weilersteen G., Vaglio-Laurin R. Compressibility effects in free turbulent shear flows, TR-75-1436, AFOSR, 1975.
- 9. F.R. Menter. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective // International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2009, vol. 23, issue 4, pp. 305–316
- 10. А.И. Трошин. Полуэмпирическая модель турбулентности для описания высокоскоростных слоев смешения и струй, не основанная на гипотезе Буссинеска. Жуковский, 2014. 168 с
- 11. B. Magnussen, On the structure of turbulence and a generalized eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow, paper presented at the 19th AIAA Aerospace Science Meeting, St Louis, MO, 1981.
- 12. Ertesvåg, I. S., and Magnussen, B. F., "The Eddy Dissipation Turbulence Energy Cascade Model, " Combustion Science and Technology, Vol. 159, No. 1, 2000, pp. 213 – 235.
- 13. Karlsson, J. A. J., "Modeling Auto-Ignition, Flame Propagation and Combustion in Non-Stationary Turbulent Sprays," Ph.D. Thesis, Chalmers Univ. of Technology, Göteborg, Sweden, 1995.
- 14. NASA TM X-72678: A STUDY OF REACTING FREE AND DUCTED HYDROGEN/AIR JETS by H. Lee Beach, Jr., May 1975.
- NASA TP-1169: "Application of a Two-Dimensional Parabolic Computer Program to Prediction of Turbulent Reacting Flows" by Evans, J. S., Schexnayder, C. J., and Beach, H. L., March 1978. (J. S. Evans, C. J. Schexnayder Jr, H. L. Beach Jr, NASA Technical Paper,1169, 1978)
- 16. Jason W. Norris, Jack R. Edwards Large-Eddy Simulation of High-Speed, Turbulent Diffusion Flames with Detailed Chemistry. AIAA 97-0370
- 17. H. Mobus, P. Gerlinger D. Bruggemann. Scalar and joint scalar-velocity-frequency Monte Carlo PDF simulation of supersonic combustion. Combustion and Flame 132 (2003) 3–24
- 18. Heeseok Koo, Pratik Donde, Venkat Raman. A quadrature-based LES/transported probability density function approach for modeling supersonic combustion. Proceedings of the Combustion Institute 33 (2011) 2203–2210.
- Calhoon Jr W. H. et al. Scalar Fluctuation and Transport Modeling for Application to High Speed Reacting Flows //AIAA Paper No. AIAA-2006-1452, 44th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV. – 2006.
- 20. Houshang B. Ebrahimi. CFD Validation For Scrarnjet Combustor and Nozzle Flows, Part I. AIAA-93-1840. 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit June 28-30, 1993.
- Houshang B. Ebrahimi, M .Gilbertson. Two and Three Dimensional Parabolized Navier-Stokes Code for Scramjet Combustor, Nozzle and Film Cooling Analysis. AIAA 92-0391. 30th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit January 6-9,1992
- 22. A. D. Cutler, G. Magnotti, R. Bauerle, D. Bivolaru, S. Tedder, P. M. Danehy, M. C. Weikl, F. Beyrau, T. Seeger, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit AIAA-2007-978, Reno, NV, 2007.
- 23. S. A. Tedder, D. Bivolaru, P. M. Danehy, M. C. Weikl, F. Beyrau, T. Seeger, AD. Cutler, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit AIAA-2007-0871, Reno, NV, 2007.
- 24. T. S. Cheng, J. A. Wehrmeyer, R. W. Pitz, O. Jarrett Jr, G. B. Northam, Combust. Flame 1994, 99, 157.

#### Построение библиотеки решения уравнений кинетики в процессе расчета

В.В.Власенко, А.А.Ширяева, Е.С.Матяш

При решении системы уравнений Рейнольдса для трехмерных нестационарных течений многокомпонентного неравновесно реагирующего газа к 7 дифференциальным уравнениям в частных производных, которые используются в RANS-подходе для течений воздуха (уравнение неразрывности, три уравнения импульса, уравнение энергии и два уравнения дифференциальной модели турбулентности) добавляется N ~ 10 дифференциальных уравнений в частных производных для массовых концентраций компонент реагирующей смеси ( $N = N_{sp} - 1$ , где  $N_{sp}$  полное число компонент смеси). При этом затраты на проведение расчета возрастают пропорционально не N, а  $(N^2 - N^3)$ . Дело в том, что система уравнений химической кинетики является жесткой [1] и требует использования локально-неявных численных методов для аппроксимации источниковых членов, связанных со скоростями химических реакций. Поэтому система уравнений для нахождения состава реагирующей смеси на следующем (неизвестном) временном слое представляет собой систему нелинейных уравнений, которую приходится решать итерационным методом. В работе используется метод Ньютона. Этот метод требует на каждой итерации находить численно матрицу Якоби источниковых членов  $\partial \vec{S}(\vec{Y}) / \partial \vec{Y}$  (размерность  $N \times N$ ) и численно ее обращать. При этом на каждом шаге по физическому времени делается от 5 до 100 итераций метода Ньютона. Количество затрат имеет порядок  $(N^2 - N^3)$ .

Применение методов описания турбулентного горения (например, методов PaSR, которые рассматриваются в настоящем Проекте) увеличивает число затрат еще на порядок или более. Дело в том, что методы PaSR предполагают, что горение происходит в т.н. "тонких структурах", распределенных по объему течения, и что процессы в тонких структурах напоминают процессы в в реакторе реакторе. Если при ЭТОМ предполагается, что процессы развиваются квазистационарным образом, то на каждом шаге по физическому времени необходимо находить стационарное решение системы уравнений химической кинетики для реактора. А для этого нужно решать систему нестационарных уравнений реактора ( *N* обыкновенных дифференциальных уравнений) методом установления по псевдовремени. В результате каждый шаг по физическому времени распадается еще на 10-100 шагов по псевдовремени, и на каждом шаге по псевдовремени решается итерационным методом Ньютона система нелинейных уравнений химической кинетики.

В результате вычислительные затраты на решение задач с неравновесным горением оказываются несопоставимо большими по сравнению с затратами при численном решении обычных задач вычислительной аэродинамики.

Возможным способом существенного сокращения этих затрат является *метод построения в* процессе расчета баз данных по скоростям реакций - ISAT (In Situ Adaptive Tabulation), предложенный еще в работах Поупа [2]. Вкратце этот метод может быть описан следующим образом.

- Определяются параметры, от которых зависит решение уравнений кинетики. Для простоты рассмотрим случай, когда химические источниковые члены зависят всего лишь от двух параметров от температуры *T* и концентрации топлива *Y*. Температура меняется в пределах [*T*<sub>min</sub>; *T*<sub>max</sub>], концентрация в пределах [0; 1]. Тогда возможные значения параметров лежат в пределах прямоугольника [*T*<sub>min</sub>; *T*<sub>max</sub>]×[0; 1] см. рис.1.
- Пространство параметров, от которых зависит решение уравнений кинетики, дискретизируется (покрывается сеткой с конечным числом шагов по каждому параметру). Получается сетка возможных значений параметров, показанная на рис.1. Эта сетка может

быть неравномерной – ее можно сгущать в областях быстрого изменения решения системы уравнений химической кинетики.

- При проведении расчета решение уравнений химической кинетики системы ищется для узлов таблицы, ближайших к значениям, которые получаются в процессе расчета, и записывается в таблицу (табулируется).
- Если данный узел сетки возможных значений параметров уже был обработан раньше, то решение извлекается из таблицы и используется в расчете.
- При длительных расчетах нестационарных квазипериодических процессов используемое множество узлов вскоре перестает меняться (красные точки на рис.1). Тогда затраты на решение системы уравнений химической кинетики в каждой точке физического пространства на каждом шаге физического времени заменяются на затраты по поиску места в таблице, которое соответствует текущему состоянию реагирующего течения, и извлечению готового решения из этой таблицы.



Рисунок 1 - Сетка возможных значений параметров в методе ISAT

Показано: если рассматривается метод Unsteady PaSR, когда решение зависит от полного набора параметров в предыдущий момент времени, то число параметров оценивается как  $(2N_{sp}+3)$ . Если же рассматривается классический метод PaSR, когда реактор считается квазистационарным, то решение зависит лишь от температуры в реакторе в предыдущий момент времени, и тогда число параметров оценивается как  $(N_{sp}+3)$ . Например, для смешанной модели горения пропана и водорода в воздухе, которая будет использоваться в настоящем Проекте,  $N_{sp} = 10$ . Таким образом, пространство параметров, от которых зависит решение уравнений кинетики, является многомерным. Поэтому даже при грубой дискретизации этого пространства полное число узлов сетки возможных значений параметров становится огромным, и таблица требует очень большой памяти, и поиск нужного места в такой таблице тоже становится непростым. Существуют математические методы (см., напр., [2], [3]), которые позволяют минимизировать эти вычислительные затраты так, чтобы они стали существенно ниже, чем затраты на решение системы уравнений кинетики в каждой точке физического пространства на каждом шаге физического времени. Известен опыт других вычислителей, которые сообщают об

ускорении расчета на порядок. Это открывает большие перспективы – решение практических задач со сложными геометриями камер сгорания, использование детальных кинетических механизмов и пр.

Предполагается разработка собственного варианта метода ISAT. Планируется провести его в два этапа. На первом этапе разрабатываются эффективные методы построения библиотеки решений уравнений кинетики в процессе расчета (т.е. в памяти компьютера сохраняются только решения уравнений кинетики для тех значений параметров, которые возникали в процессе расчета). На втором этапе библиотеку решений, построенную для рассмотренных режимов работы высокоскоростной камеры сгорания, предполагается сохранить и построить на ее базе имитационную модель [4], т.е. аппроксимировать возможные решения системы уравнений кинетики аналитическими функциями, которые практически не требуют памяти для своего хранения и не требуют тратить время на поиск нужного места в многомерной таблице.

Начаты работы по 1-му этапу данного плана. В качестве инструмента для накопления базы данных решений уравнений кинетики выбраны хеш-таблицы [5]. К настоящему моменту координаты узлов сетки пространства параметров уравнений кинетики (рис.1) считались действительными числами. Если параметры течения в данной точке камеры сгорания в данный момент времени попадали в некоторую ячейку сетки пространства параметров уравнений кинетики, узлы которой уже обрабатывались раньше, то в качестве решения системы уравнений химической кинетики в данной точке камеры сгорания использовалось решение из ближайшего узла. При этом возникали ошибки, связанные с разрывным изменением параметров, которые приводили к возникновению в расчете нефизичных автоколебательных процессов. При текущем состоянии программы построения ISAT-библиотеки единственный способ устранения таких автоколебаний заключался в уменьшении погрешностей дискретизации, т.е. измельчении сетки пространства параметров уравнений кинетики (с соответствующим ростом памяти для хранения библиотеки и с ростом затрат на поиск в огромных массивах).

Поэтому пока проведенные тесты показали максимальное ускорение за счет метода ISAT всего лишь в 2 раза по сравнению со стандартным расчетом (в котором уравнения кинетики решаются в каждой точке камеры сгорания на каждом шаге по времени). Так, для вычисления 1000 итераций в тесте Эванса, Шекснайдера и Бича без использования кэша потребовалось 161 сек. С использованием готового кэша те же 1000 итераций потребовали 84 сек.

Возможные пути повышения эффективности алгоритма построения метода ISAT: 1) ускорение поиска и снижение затрат памяти за счет приведения параметров задачи к целым числам; 2) устранение проблемы автоколебаний за счет использования интерполяции решения по ближайшим обработанным узлам библиотеки и определение максимально допустимой величины шага дискретизации пространства параметров – с соответствующим ускорением поиска и снижением затрат памяти благодаря снижению размеров библиотеки.

- 1. Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. М., "Мир". –1990. 660 с.
- 2. U. Maas, S.B. Pope. Simplifying chemical kinetics: Intrinsic Low-Dimensional Manifolds in composition space. // Combustion and Flame, Vol.88, pp.239-264 (1992).
- 3. S.B. Pope. Computationally efficient implementation of combustion chemistry using in situ adaptive tabulation. // Combustion Theory and Modelling, Vol1., No.1, pp. 41-63 (1997).
- 4. Н.А.Зленко. Особенности создания многофакторных имитационных моделей аэродинамических объектов. Труды ЦАГИ, №2760, 2017, стр.4-19.
- 5. Ворожцов А.В., Винокуров Н.А. Алгоритмы: построение, анализ и реализация на языке программирования Си. Москва, МФТИ, 2007, 452 с.

## Программа для LES-расчетов и проведенные тесты

С. Бахнэ<sup>1</sup>, С.В. Михайлов, <u>А.И. Трошин</u>

<sup>1</sup> ФАЛТ МФТИ, г. Жуковский

Расчеты в Лаборатории планируется проводить на базе подхода Рейнольдса (RANS – Reynolds-averaged Navier–Stokes) и на базе методов моделирования крупных вихрей (LES – Large eddy simulation). RANS-расчеты из-за своей экономичности будут использоваться для отбора и калибровки физических моделей, для изучения влияния деталей постановки задачи и в других случаях, требующих параметрических расчетов. Однако стационарные RANS-расчеты дают лишь осредненное поле течения, что ограничивает возможности физически корректного описания моделируемых процессов. Вихреразрешающие LES-расчеты, с другой стороны, напрямую воспроизводят нестационарные трехмерные крупномасштабные структуры течения. Это – очень перспективное направление: в отличие от RANS, в LES-расчете естественным образом описываются турбулентная диффузия, производство кинетической энергии турбулентности, эффекты неравновесности пульсаций, обмен энергией между компонентами возмущений. Следует иметь в виду, что LES-расчеты требуют суперкомпьютерных ресурсов. Такие расчеты единичные, необходимо заранее хорошо продумывать постановки задач и отлаживать физические модели.

Представленная программа zFlare основана на кодах ZEUS [1] и ZEUS-S3pp [2]. Численная схема — конечно-объемная второго порядка аппроксимации. Для повышения ее разрешающей способности используется WENO-реконструкция пятого либо девятого порядка в каждом сеточном направлении. Движение по времени осуществляется с помощью явной схемы с локально-неявной аппроксимацией источниковых членов с глобальным либо дробным шагом по времени. Используются многоблочные гексаэдральные сетки. Возможен расчет течения как однокомпонентного газа, так и смеси газов с химическими реакциями. Поддерживается многопроцессорный расчет на системах с распределенной памятью с помощью библиотеки MPI.

Из-за невозможности разрешения нестационарных турбулентных структур вплоть до стенки (вследствие высоких чисел Рейнольдса в типичных задачах) решено использовать гибридные RANS/LES-модели турбулентности, которые работают в режиме RANS у стенки и переходят в режим LES в свободном потоке. Выбрана одна из наиболее популярных в настоящее время моделей SST-IDDES [3], которая относится к семейству DES (Detached eddy simulation, М.Л. Шур и М.Х. Стрелец, СПбГУ). В модель решено включить поправку SLA, ускоряющую развитие нестационарных возмущений в начале слоев смешения [4]. В качестве ограничителя производства турбулентности имеется возможность применения как стандартной поправки « $P \leq 10\varepsilon$ » к обоим уравнениям модели SST, так и формулы Като–Лаундера [5].

Тестирование возможностей вихреразрешающих расчетов программы осуществлялось в несколько этапов: верификация порядка точности схемы высокого разрешения, валидация режимов ILES (implicit LES, т.е. без модели подсеточных напряжений) и LES (SST-DES в задаче без твердых поверхностей), валидация RANS-части гибридной модели в задаче о пограничном слое на пластине.

Первая задача – это диагональная конвекция изоэнтропического вихря в невязком приближении. В квадратной расчетной области (одна ячейка в однородном направлении z) с попарно периодическими граничными условиями задавалось начальное поле, соответствующее вихрю, который движется по диагонали. В точном решении вихрь возвращается в исходное состояние после каждого периода конвекции, а в расчетах – постепенно диссипирует из-за численной вязкости. В данном тесте мерой ошибки было принято снижение перепада плотности в центре вихря после 10 периодов конвекции. Сходимость решений по сетке и оценка порядков точности подтверждают достижение второго порядка и пониженный уровень ошибки схем WENO по сравнению со стандартной реконструкцией 2 порядка аппроксимации.

Вторая задача – вихрь Тейлора–Грина [6]. В кубической расчетной области с периодическими границами задается система крупных вихрей, которая с течением времени разрушается, порождая турбулентность, близкую к изотропной. Течение описывается уравнениями Навье–Стокса, начальное число Рейнольдса равно 1600. Построена система вложенных сеток с максимальной размерностью 512<sup>3</sup> ячеек, использовались 512 ядер кластера с процессорами Intel Xeon E5-2690 v3.

Анализ скорости диссипации кинетической энергии турбулентности и энстрофии еще раз подтвердил, что на густых сетках порядок сеточной сходимости по схеме WENO9 приближается ко второму. Достигнута наименьшая ошибка в определении пикового значения энстрофии, равная 4.7%. Также установлено, что в расчетах течений с квазиравновесной турбулентностью разрешение мелкомасштабного поля турбулентности не играет ключевой роли в формировании потока энергии от крупнейших вихрей вниз по каскаду. Этим, в частности, объясняется работоспособность методов ILES во многих задачах.

Третья задача – распад изотропной турбулентности в кубической расчетной области  $[-\pi L, \pi L]^3$  с периодическими границами. В начальный момент времени задавалось случайное поле скорости со спектром Кармана [7]. Изучалась скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, которая аппроксимируется степенным законом  $E_k(t) \sim (t-t_0)^n$ ,  $n \sim -1.4 \div -1$ , и энергетический спектр E(k), который должен содержать инерционный интервал Колмогорова  $E(k) = C_k (-dE_k / dt)^{2/3} k^{-5/3}$ . Использовались равномерные сетки 256<sup>3</sup> и 64<sup>3</sup> ячеек. Расчеты проводились по уравнениям Навье–Стокса (ILES) и по модели SST-DES. Для исследования влияния диссипативных свойств схемы варьировалось значение коэффициента  $\alpha_{diss}$  в формуле Роу

$$\hat{\mathbf{F}}_{\text{conv}} = \frac{\mathbf{F}_{\text{conv}}(\mathbf{U}_L) + \mathbf{F}_{\text{conv}}(\mathbf{U}_R)}{2} - \alpha_{\text{diss}} \left| \frac{d\mathbf{F}_{\text{conv}}}{d\mathbf{U}} \right| \frac{\mathbf{U}_R - \mathbf{U}_L}{2}.$$

В расчетах действительно получены степенные законы для  $E_k$  с показателями n от -1.2 до -1.4, причем установлено, что значение коэффициента  $\alpha_{diss}$  в диапазоне  $0.1 \div -1$  не влияет на скорость диссипации. В ILES-расчете на сетке  $256^3$  ячеек обнаружен протяженный степенной участок спектра E(k), однако коэффициент его наклона не вполне точно совпадает с -5/3, а монотонно убывает от -1.45 до -1.79. Анализ формы спектра позволяет заключить, что величина  $\alpha_{diss} = 0.4$  – наименьшее приемлемое значение диссипативного параметра схемы  $\alpha_{diss}$  при использовании ILES.

Серия ILES-расчетов на сетке  $64^3$  ячеек выявила появление участка спектра с устойчивым коэффициентом наклона, близким к -5/3, при более продолжительном счете. Скорость затухания кинетической энергии турбулентности оказалась практически совпадающей с расчетом на подробной сетке  $256^3$  ячеек. Тот же результат получен и в DES-расчете, несмотря на полное отсутствие в нем инерционного интервала. Дополнительный анализ влияния величины  $\alpha_{diss}$  в DES-расчете показал, что даже с  $\alpha_{diss} = 0.1$  существенного ухудшения формы спектра не происходит. Подсеточная модель обеспечивает собственный механизм диссипации энергии, сглаживающий поле течения и ослабляющий влияние схемы на разрешенные коротковолновые пульсации. Это повышает надежность DES-расчетов, делая выбор схемы менее критическим фактором, чем в случае ILES.

Четвертая задача – турбулентный пограничный слой на пластине при числе Маха  $M_{\infty} = 2$ . Использовались модели турбулентности SST-DES, DDES, IDDES с поправкой SLA и без нее. Рассматривались RANS-решения, которое дают эти модели в условиях невозможности развития трехмерных возмущений (одна широкая ячейка в направлении оси *z*). В расчетах изучено установление интегральной силы трения на пластине. Показаны влияние поправки SLA и эффект «экранирующей» функции DDES, благодаря которому модели SST-DDES и IDDES дают то же стационарное решение, как и стандартная модель SST. В отличие от них, модель SST-DES предсказывает заниженное трение на пластине при использовании поправки SLA.

- 1. Власенко В. В., Кажан Е. В., Матяш Е. С., Михайлов С. В., Трошин А. И. Численная реализация неявной схемы и различных моделей турбулентности в расчетном модуле ZEUS //Труды ЦАГИ. 2015. №. 2735. С. 5-49.
- 2. Ширяева А. А. Особенности численного метода и результаты тестирования программы ZEUS-S3pp для моделирования трехмерных течений с горением //Труды ЦАГИ. 2015. №. 2735. С. 220-246.
- 3. Gritskevich M. S., Garbaruk A. V., Schütze J., Menter F. R. Development of DDES and IDDES Formulations for the *k*-ω Shear Stress Transport Model //Flow, turbulence and combustion. 2012. T. 88. №. 3. C. 431-449.
- 4. Shur M. L., Spalart P. R., Strelets M. K. Travin A. K. An enhanced version of DES with rapid transition from RANS to LES in separated flows //Flow, turbulence and combustion. 2015. T. 95. №. 4. C. 709-737.
- 5. Kato M., Launder B. E. The modelling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders //Turbulent Shear Flow. 1993. T. 1.
- 6. Brachet M. E. Direct simulation of three-dimensional turbulence in the Taylor—Green vortex //Fluid dynamics research. – 1991. – T. 8. – №. 1-4. – C. 1-8.
- 7. Etkin B. Dynamics of atmospheric flight. New York: John Wiley & Sons Inc., 1972.

#### Управление детонационным горением водородно-воздушной смеси

Левин В.А., <u>Журавская Т.А.</u> ЦАГИ, г. Жуковский - НИИ механики МГУ, г. Москва

Актуальность исследований особенностей распространения детонационных волн в горючих газовых смесях обусловлена, главным образом, желанием использовать детонационное горение в различных энергетических установках. Особый интерес вызывают исследования, цель которых – выявление механизмов управления детонацией.

Хорошо известно, что скорость распространения волн детонации в газовых смесях сильно зависит от состава смеси, концентраций горючего и окислителя, наличия в смеси различных добавок [1], [2]. Это позволяет контролировать распространение детонационной волны, а при необходимости обеспечить срыв детонационного горения. Так, в [3] численно установлено, что увеличение объемной доли неподвижных инертных частиц в газовой смеси приводит к укрупнению ячейки проходящей через частицы детонационной волны, а при дальнейшем увеличении доли частиц – к разрушению детонации. В [4] экспериментально установлена возможность полного гашения детонационного горения в газовой смеси завесой из инертных частиц пыли. Однако в ряде случаев необходимо сохранить детонационную волну или обеспечить реинициирование детонации.

В данном докладе представлены результаты численного исследования детонационного горения стехиометрической водородно-воздушной смеси, проведенного с целью изучения возможности управления детонацией посредством предварительной конверсии топлива.

Для моделирования исследуемых течений с детонационными волнами применялся разработанный авторами и апробированный ранее программный комплекс [5-6]. Для описания химического взаимодействия использовался кинетический механизм окисления водорода, предложенный в [7]. Решение уравнений газовой динамики, описывающих плоское двумерное нестационарное течение невязкой многокомпонентной реагирующей газовой смеси, было проведено конечно-разностным методом, основанным на схеме С.К. Годунова [8]. Исследования проводились на мелкой расчетной сетке (шаг разбиения 0.007 – 0.01 мм), обеспечивающей корректное разрешение структуры детонационной волны, с использованием гибридного распараллеливания расчетов МРІ/ОрепМР на оборудовании Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [9].

Исследовано детонационное горение покоящейся стехиометрической водородновоздушной смеси, в которой часть молекулярного водорода и молекулярного кислорода предварительно преобразовывалась в атомарные газы. Установлено, что указанная конверсия смеси приводит к уменьшению поперечного размера детонационной ячейки и увеличению скорости распространения самоподдерживающейся волны, что позволяет использовать конверсию для управления детонационным горением. Кроме того, обнаружено, что в случае необходимости скорость распространения детонации можно существенно уменьшить добавлением в горючую смесь мелких инертных частиц. Так, в случае детонационного горения подготовленной смеси H<sub>2</sub>, H, O<sub>2</sub>, O, N<sub>2</sub> и Ar в объемном соотношении 41.16 : 1.68 : 20.58 : 0.84 : 78 : 1 скорость распространения самоподдерживающейся детонации *D*≈2004м/с, а детонационная ячейка более чем в 1.6 раза меньше ячейки в неподготовленной стехиометрической водородно-воздушной смеси (H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и Ar в объемном соотношении 42 : 21 : 78 : 1 соответственно). Численный аналог следа плоской детонационной волны в рассмотренном случае представлен на рисунке 1а. Для сравнения на рисунке 16 дана ячеистая структура детонационной волны в неподготовленной смеси, скорость распространения которой *D*≈1973м/с. Однако добавление в горючую смесь мелких инертных частиц (массовая доля Y=0.104) приводит к увеличению детонационной ячейки более чем в 1.4 раза (рисунок 1*в*), а скорость детонации в этом случае уменьшается до  $D \approx 1827$  м/с.



Рисунок 1. Ячеистая структура распространяющейся в плоском канале волны детонации: a – предварительно подготовленная стехиометрическая водородно-воздушная смесь;  $\delta$  – неподготовленная стехиометрическая водородно-воздушная смесь; e – смесь с добавлением мелких инертных частиц. Здесь X = x/L, Y = y/L, где L – ширина канала

Установленная возможность контроля скорости волны была использована для стабилизации детонационного горения в сверхзвуковом потоке газовой смеси в симметричном плоском канале с сужением. Проведенное численное исследование показало, что в ряде случаев, когда геометрические параметры канала не обеспечивают стабилизацию детонации в сверхзвуковом потоке, добавление в поступающую в канал газовую смесь мелких инертных частиц приводит к формированию в канале создающего тягу течения со стабилизированной детонационной волной.

- 1. Солоухин Р. И. Ударные волны и детонация в газах. Гос. изд-во физико-математической лит-ры, 1963.
- 2. Lee J. H. S. The detonation phenomenon. Cambridge : Cambridge University Press, 2008.
- 3. Bedarev I. A., Fedorov A. V. Mathematical modeling of the detonation wave and inert particles interaction at the macro and micro levels //Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2017. T. 894. №. 1. C. 012008.
- 4. Васильев А. А. и др. Что горит в шахте: метан или угольная пыль? //Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53. №. 1. С. 11-18.
- 5. Журавская Т.А., Левин В.А. Устойчивость течения газовой смеси со стабилизированной детонационной волной в плоском канале с сужением // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2016. № 4. С. 120-129.
- Levin V.A., Zhuravskaya T.A. Stabilization of Detonation Combustion of a Supersonic Flow due to Using the Special Form Plane Channel // 30th International Symposium on Shock Waves 1 / Ben-Dor G., Sadot O., Igra O. (eds). Springer International Publishing AG, 2017. – P. 419-424.
- 7. Старик А. М. и др. О механизме окисления синтез-газа //Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46. – №. 5. – С. 3-19.
- 8. Годунов С. К. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. 1976.
- 9. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин Вад.В. Практика суперкомпьютера "Ломоносов" // Открытые системы. 2012. № 7. С. 36 39.

#### Численное моделирование детонации в изогнутом канале круглого сечения и трехмерной вращающейся детонации в кольцевом зазоре

В.А. Левин, <u>И.С. Мануйлович</u>, В.В. Марков ЦАГИ, г. Жуковский - НИИ механики МГУ, г. Москва

Актуальность исследований трехмерных волн детонации в горючих газовых смесях определяется необходимостью разработки теоретических основ для создания эффективных энергетических установок, в которых реализуется высокоскоростное сжигание топлива в режиме детонации. Одними из основных проблем, которые требуется решить – это инициирование и локализация процесса в ограниченном объеме камеры сгорания.

Как известно, детонацию можно инициировать достаточно мощной ударной волной, которая формируется в горючей смеси, например, при взрыве или при взаимодействии сверхзвукового потока с непроницаемой поверхностью [1, 2]. Источником энергии инициирования детонации в последнем случае является кинетическая энергия горючей смеси. Идея использовать энергию горючей смеси для инициирования детонации и ее стабилизации в ограниченном объеме без внешнего источника энергии была реализована в ряде работ [3 – 7].

Численное исследование двух представленных в докладе задач [8, 9] проводилось с использованием разработанного авторами вычислительного комплекса с удобным интерфейсом на суперкомпьютере «Ломоносов» Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [10].

В докладе приведены результаты исследования процесса инициирования и формирования детонации в сверхзвуковом потоке однородной горючей смеси, втекающей с постоянной скоростью в цилиндрический канал круглого сечения с изгибом. Рассматривается трёхмерный канал постоянного круглого сечения, состоящий из двух круговых цилиндров, сопряженных каналом в форме тора, которым задается изгиб. В данной задаче исследуется перспективный способ инициирования детонации без подвода энергии извне, а только за счет кинетической энергии сверхзвукового потока, которая трансформируется в тепловую энергию в системе ударных волн, формирующихся в канале в результате взаимодействия смеси со стенками в зоне изгиба канала. Такой тип инициации детонации может быть использован как отдельно, так и в составном устройстве, содержащем двигатель с резонатором и вращающейся детонацией (ДРВД). Изучены процессы формирования ударно-волновых структур и определены критические условия возникновения и эволюции детонации, связанные со скоростью набегающего потока, углом поворота и диаметром поперечного сечения канала.

Расчеты для всех значений определяющих параметров включали фазу стабилизации потока воздуха, на которой в начальный момент времени в канал, заполненный покоящимся воздухом, через входное сечение начинает поступать сверхзвуковой поток, и за конечное время течение выходит на стационарный режим. После этого вместо воздуха втекает горючая пропановоздушная смесь. Согласно результатам серийных расчетов, в зависимости от определяющих параметров задачи формируется один из трех режимов течения – без детонации, с детонацией, выходящей из канала через входное сечение, или со стационарной детонацией вблизи места изгиба. При достаточно высокой скорости втекающего сверхзвукового потока, превышающей некоторую критическую, а также для углов поворота канала, больших определенного критического значения, горючая смесь воспламеняется за ударными волнами вблизи изгиба канала. При скорости потока, большей критической, детонация стабилизируется в канале вблизи зоны изгиба. Расчеты показали, что при скорости потока, меньшей этой критической, детонационная волна выходит из канала через входное сечение.

Сформулирована задача, моделирующая процесс инициирования и сгорания во вращающейся волне детонации пропановоздушной смеси в кольцевом зазоре камеры сгорания с резонатором специальной конструкции. Создана параметрическая модель геометрии ДРВД,

позволяющая в дальнейшем проводить оптимизацию геометрии камеры сгорания. Реализована система подачи смеси из резервуара с заданными параметрами торможения с учётом соотношения давления в резервуаре и статического давления в камере сгорания на входе в неё. Разработана специализированная программа с пользовательским графическим интерфейсом, предназначенная для выполнения расчетов на суперкомпьютере МГУ «Ломоносов» и представляющая собой «виртуальную экспериментальную установку», позволяющую моделировать вращающуюся детонацию в кольцевом зазоре для широких диапазонов определяющих параметров. Проведен расчет без инициирования детонации и для стационарного истечения при давлении торможения в резервуаре 40 атм получено значение силы, действующей на часть тяговой стенки, 4900 Н. Проведён цикл расчётов, позволивший выбрать оптимальные значения параметров инициатора вращающейся детонации, реализовать вращающуюся детонацию и исследовать возникающие ударно-волновые структуры течения. Визуализированы поля газодинамических параметров и построены графики временной зависимости для силы, действующей на часть тяговой стенки. Проведен анализ формирующейся картины течения, Согласно расчетам, при давлении торможения горючей смеси в 40 атм за счет вращающейся детонации сила, действующая на часть тяговой стенки испытывает высокочастотные колебания и ее среднее по времени значение достигает 9600 Н. Проведено исследование зависимости структуры течения и параметров вращающейся детонации от давления торможения на входе в камеру сгорания посредством двух расчетов с медленным изменением давления торможения при одновременном контроле параметров течения. Изменение давления торможения производилось по линейному закону от времени с изменением величины за период вращения, меньшим 1% от начального давления торможения. Из расчетов следует, что частота вращения детонации возрастает с увеличением давления торможения на входе и убывает с его уменьшением. В расчетах обнаружено два режима с вращающейся детонацией – полностью стационарный режим вращения и режим с периодической высокочастотной перестройкой внутренней структуры течения. Реализуемый режим вращения зависит давления торможения. Расчеты показали, что среднее значение силы, действующей на рассмотренную часть тяговой стенки, почти пропорционально давлению торможения.

Из результатов расчета с уменьшением давления торможения следует, что режим с вращающейся детонацией существует при давлении торможения, большем критического, равного 10 атм. Стационарный режим вращающейся детонации реализуется в диапазоне давлений торможения от 10 до 16 атм. Колебательный режим вращения реализуется в диапазоне давлений торможения от 16 до 40 атм (начальное значение для указанного расчета). Расчеты показывают, что частота колебаний внутренней структуры течения не связана с частотой вращения детонации.

Из результатов расчета с увеличением давления торможения следует, что режим с вращающейся детонацией реализуется при любых значениях давления торможения в диапазоне от начального давления торможения 40 атм до 104 атм – последнего значения давления торможения в расчете. Анализ результатов расчетов наводит на мысль, что верхней границы давления торможения, за которой вращение детонации невозможно, не существует. Расчет с увеличением давления торможения также обнаруживает два возможных режима вращающейся детонации – полностью стационарный и с наличием колебаний. Стационарный режим течения имеет место для давлений торможения от 47 до 90 атм, с колебаниями структуры течения – в остальных случаях.

В итоге установлено, что стационарный режим вращения детонации реализуется для давлений торможения в диапазонах от 10 до 16 атм и от 47 до 90 атм. Колебательный режим детонации наблюдается в диапазонах давления торможения от 16 до 47 атм и от 90 атм до 104 атм (возможно, и более). При давлении торможения на входе в сопло менее 10 атм вращающаяся детонация не реализуется.

- 1. Седов Л.И., Коробейников В.П., Марков В.В. Теория распространения взрывных волн // Тр. МИАН СССР.– 1986. Т. 175. С. 178–216.
- 2. Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Возбуждение и срыв детонации в газах // Инженерно-физический журнал. 2010. 83:6. С. 1202–1211.
- Марков В.В., Семенов И.В., Уткин П.С. Ахмедьянов И.Ф. Инициирование детонации в трубе с параболическим сужением и коническим расширением 31:3. – С. 334–338.
- 4. Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Стабилизация детонации в сверхзвуковом потоке // Вестник Моск. ун-та. Сер. 1. Матем. Мех. – 2011. – № 4. – С. 28–33.
- 5. Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Математическое моделирование ударноволновых процессов при взаимодействии газов с твердыми границами // Тр. МИАН. – 2013. – Т. 281. – С. 42–54.
- 6. Журавская Т.А., Левин В.А. Устойчивость течения газовой смеси со стабилизированной детонационной волной в плоском канале с сужением // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2016. № 4. С. 120-129.
- Levin VA, Nechaev JN, Tarasov AI. A new approach to organizing operation cycles in pulsed detonation engines. In: High-Speed Deflagration and Detonation: Fundamentals and Control. Eds. G.D. Roy, S.M. Frolov, R.W. Netzer, and A.A. Borisov. Moscow, 2001, ELEX-KM Publisher, p. 223-238, (ISBN 5 93815 003 5).
- 8. Мануйлович И.С. Детонация в трёхмерном изогнутом канале // ДАН (принята в печать, март 2018)
- 9. Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В. Вращающаяся волна детонации в кольцевом зазоре // Труды МИАН (принята в печать, 1 кварт. 2018).
- 10. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин Вад.В. Практика суперкомпьютера "Ломоносов" // Открытые системы. 2012. № 7. С. 36 39.