

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОКАПЕЛЬНОГО ГОРЕНИЯ И ПРОЦЕССА ПОЖАРОТУШЕНИЯ В ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ В ПК CADFLO

Г.Е. Думнов, А.В. Иванов, А.В. Муслаев, В.Ю. Стрельцов  
ООО «ТС Интеграция», г. Москва, GDumnov@t1.ru

*Ключевые слова: компьютерное моделирование, двигательные установки, камера сгорания, горение, ингибирирование*

Компьютерное моделирование сложных физико-химических процессов является важным инструментом при проектировании различных технических устройств, в том числе – авиационных двигателей. Приведены основные особенности используемой математической модели горения и результаты расчетов процессов горения в двигательных установках, полученные при использовании ПК CADFLO.

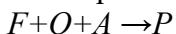
### Математическая модель

Течение газофазной топливной смеси описывается системой уравнений, включающей: осредненные по Фавру уравнения Навье-Стокса, уравнение переноса полной энтальпии, уравнения К-Е модели турбулентности и уравнения переноса химически реагирующих компонент [1].

Термодинамические свойства реагирующей газовой смеси описываются с помощью модели многокомпонентного идеального газа. Свойства реагентов и их продуктов сгорания рассчитываются для конкретной топливной смеси.

Согласно специфики используемой в CADFLO модели в состав газовой фазы входят: непрореагировавшие горючее ( $F$ ), окислитель ( $O$ ), вещество третьего компонента ( $A$ ) и их равновесные продукты сгорания ( $P$ ). Третьим компонентом может быть задано второе горючее, второй окислитель, инертный компонент или вещество, играющее роль ингибитора.

Для описания перехода с конечной скоростью исходных реагентов в равновесные продукты сгорания используется одностадийная необратимая химическая реакция:



Чтобы отразить влияние эффекта ингибирирования на процесс горения топливной смеси, в выражение для скорости условной химической реакции вводится поправка, зависящая от концентрации вещества ингибитора (компонент А) в топливной смеси. Поправка учитывает некоторое пороговое значение концентрации вещества, при котором процесс горения прекращается (скорость условной химической реакции в модели горения становится равной нулю). Необходимые значения концентраций для хладонов (114B2, 12B1, 13B1), обладающих свойствами ингибиторов, взяты из справочника [2].

Моделью допускается, что один из компонентов топливной смеси (чаще всего – горючее) может подаваться в зону горения в капельном виде, с последующим его испарением и переходом в газовую fazu. Для описания движения частиц в дисперсной fazе используется подход Лагранжа, с учетом сопротивления, испарения и изменения температуры капель. При этом учитывается обратное влияние дисперсной fazы на газовый поток.

Для расчета состояния одиночных капель в дисперсной fazе используется полуэмпирическая модель квазистационарного испарения капли, обтекаемой многокомпонентным газом в континуальном режиме [3]. Термодинамические свойства веществ в жидкой fazе определены на основе специальных справочников [4] и баз данных. В БД ПК CADFLO, помимо свойств однокомпонентных жидких горючих (метан, пропан, гептан, метanol и пр.), содержатся свойства керосинов (TC-1, T-8B, T-6, JET-A), бензина и дизельного топлива.

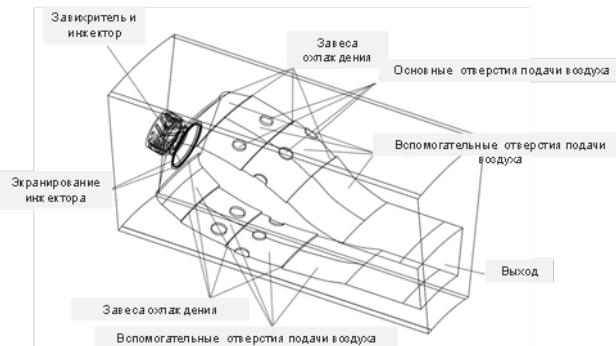
Расчет горения в КС позволяет учесть особенности процесса смешения топливных компонент, а также сопряженный теплообмен со стенками камеры.

Реализована возможность расчета равновесных концентраций основных компонент в продуктах сгорания и прогнозирования образования термического NO на базе механизма Зельдовича.

### Расчет течения в камере сгорания ДУ

Камера сгорания представляет собой сложную конструкцию, состоящую из перфорированных и сплошных стенок со множеством первичных и вторичных отверстий, через которые подается воздух для завес охлаждения и организации полного сгорания топлива.

Моделируемая КС имеет периодическую структуру из 18 секторов, в каждом расположен один блок: завихритель/форсунка, четыре первичных и четыре вторичных отверстия для подачи воздуха (рис. 1). В соответствии с этим задача считалась в постановке с секторной периодичностью.

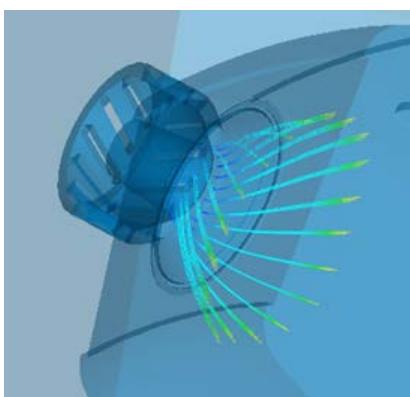


*Rис.1 – Компоновка камеры сгорания*

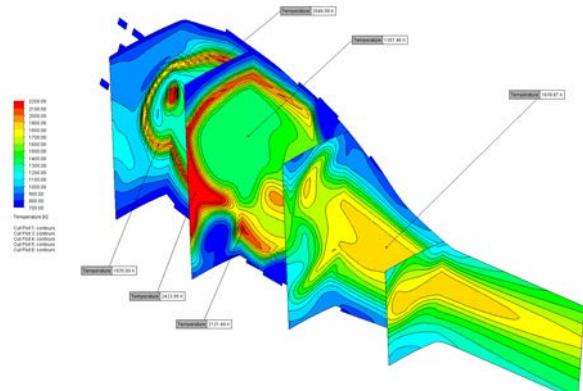
Топливная смесь: Керосин Jet-A1/воздух. Суммарный расход воздуха в расчете на один сектор составляет 1.2285 кг/с. Параметры воздуха, поступающего в камеру сгорания после компрессора:  $P=21.4$  бар,  $T=744$  К. Топливо впрыскивается в виде капель в областях, расположенных в месте распада жидкой топливной пелены в непосредственной близости от внешней кромки форсунки (рис. 2). При задании начальных значений диаметров, температуры и скорости капель привлекались экспериментальные данные.

Генерация расчетной сетки проводилась в автоматическом режиме, с минимальными ручными настройками.

Рассчитанные поля температуры в продольном и поперечном сечениях камеры приведены на рис. 3.



*Rис.2 – Схема распыла горючего*



*Rис.3 – Поле температур внутри КС*

Наблюдается сильная неоднородность температуры по ширине факела. Максимум температуры достигается в относительно тонком слое, где состав топливной смеси близок к стехиометрическому. В центральной части зоны горения температура существенно ниже. Воздушная завеса позволяет снизить температуру газа у стенок до  $T=1300\text{-}1400\text{K}$ , при максимальной температуре на выходе  $T=1780\text{K}$ .

## **Моделирование пожаротушения отсека ДУ самолета**

Моделируется работа системы пожаротушения, направленная на ликвидацию пожара в подкапотном пространстве ДУ самолета (рис. 4).

Методика математического моделирования пожара в общем виде делится на несколько этапов: а) моделирование условий пожара и распространения пламени по отсеку; б) расчет движения фреона из бака, наполнения коллектора и истечения через отверстия в коллекторе; в) расчет газификации впрыскиваемого фреона, его распространения по подкапотному пространству, и воздействия на распространяющийся пожар.

Расчет проводился при следующих условиях. Керосин Jet-A1 поступает в подкапотное пространство, в котором уже сформировалось течение от системы вентиляции, в газообразном виде и воспламеняется через 0.5 сек после начала исследуемого процесса. Температура подаваемого воздуха в системе вентиляции  $T=293$  К. Фреон R114B2 подается с расходом 3.5 кг/с в виде распыленных капель диаметром 100 мкм. Начальная скорость и температура капель:  $V=120$  м/с,  $T_d=253$  К. Суммарное число траекторий – 3250.

Динамика изменения средней температуры (рис. 5) в подкапотном пространстве ДУ показывает основные этапы развития пожара и пожаротушения: возгорание – 0.5 сек; срабатывание датчиков, с открытием клапанов подачи фреона из баллона в магистраль – 0.8 сек; начало впрыска капель фреона в отсек – 3.0 сек; достижение пожаротушащей концентрации ~3.16 сек.

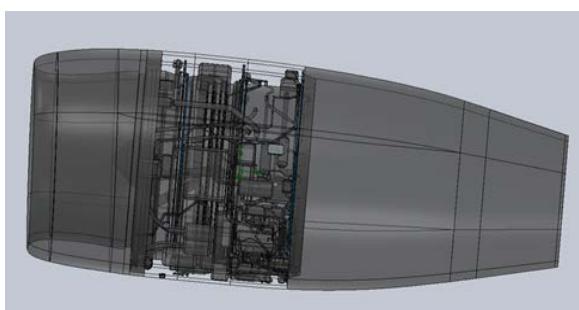


Рис.4 – Компоновка подкапотного пространства

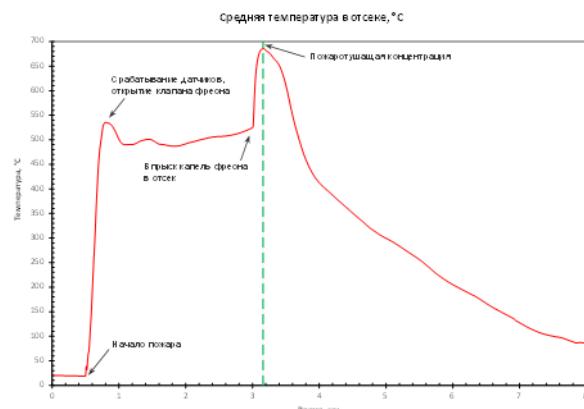


Рис.5 – Изменение температуры

## **Список литературы**

1. В.А. Волков, В.Н. Гаврилюк, В.Ю. Гидаспов и др. // Численное моделирование газокапельных реагирующих потоков в камерах сгорания двигателевых установок. Математическое моделирование. 2005 г., том 17, номер 8, С. 46-60.

2. Лужецкий В.К. Противопожарная защита самолетов гражданской авиации. М.: Транспорт. 1987. 144 С.

3. Faeth G.M. Evaporation and combustion of sprays // Prog. Energy Combust. Sci., 1983, v.9, №1/2, p.1-76.

4. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив: Справочник/Дубовкин Н.Ф., Маланичева В.Г., Массур Ю.П., Федоров Е.П. – М.: Химия, 1985. 240 с.

## **Сведения об авторах**

Думнов Геннадий Евгеньевич, к.ф.-м.н., директор направления технологий инженерного моделирования

Иванов Андрей Валерьевич, к.т.н., руководитель группы технологического тестирования

Муслаев Александр Валентинович, к.ф.-м.н., ведущий эксперт

Стрельцов Вячеслав Юльевич, к.ф.-м.н., ведущий разработчик

## **MODELING OF COMBUSTION OF GAS-DROPLET MIXTURES AND FIRE EXTINGUISHING PROCESS IN CADFLO**

G.E. Dumnov, A.V. Ivanov, A.V. Muslaev, V.Yu. Streletsov  
OOO "TS Integration", Moscow, Russia

The CADFLO multiphysics software package allows performing 3D calculations of combustion of gas and gas-droplet fuel mixtures in power plants for various purposes. A description of the mathematical model and examples of calculations applicable to combustion chambers of propulsion systems are presented.