

Амброжевич А. В., Костенко П. П., Мунштуков Д. А.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД

В предыдущей статье /1/ представлен общий подход к решению задачи создания пригодного для реализации на современных ЭВМ комплексного математического аппарата, обеспечивающего моделирование крупномасштабных нестационарных пространственно неоднородных газодинамических процессов, протекающих во всем газо-воздушном тракте ГТД. Настоящая статья посвящена более детальному рассмотрению изложенного в /1/ общего подхода применительно к подмоделям отдельных элементов ГТД. Особенности применяемых методов расчета типовых элементов ГТД: камер сгорания, решеток радиально-осевых лопаточных машин вытекают из их предназначения для синтеза математического аппарата, обеспечивающего комплексное исследование численным экспериментом нестационарных течений во всем газозоудушном тракте. Семейство методов моделирования нестационарного пространственно неоднородного газодинамического процесса в решетке профилей радиально-осевого типа подробно рассмотрено в статьях /2-5/.

Процесс в камере сгорания с непрерывной (не периодической) подачей хуже поддается формальному описанию по сравнению с процессом горения в камере периодического действия /6/, т.к. в данном случае возникает необходимость отображения (при неравномерном впрыске в пространство с неоднородным полем температур и концентраций) кинетики выгорания постулающего горючего. В связи с этим в настоящей статье предложена существенно отличающаяся от /6/ модель, позволяющая с по-

мощью достаточно простых, базирующихся на лагранжевом представлении средств, отобразить процесс сгорания непрерывно впрыскиваемого в камеру сгорания ГТД горючего.

Процесс в камере сгорания из соображений экономии вычислительных ресурсов рассматривается как 1D. Среда полагается двухкомпонентной, состоящей из "чистых" продуктов сгорания и воздуха. В соответствии с предлагаемым подходом в модели процесса, протекающего в камере сгорания, воспроизводятся с использованием метода особенностей следующие процессы:

- 1) впрыск горючего;
- 2) подвод теплоты и изменение концентраций компонентов среды;
- 3) действие гидравлического сопротивления;
- 4) течения в местах резкого изменения площади поперечного сечения проточной части;
- 5) подвод вторичного воздуха.

Течение в камере сгорания представляется в виде двух 1D потоков вторичного (рис. 1а) и первичного (рис. 1б) воздуха. В соответствии с конкретным конструктивным исполнением камеры в ее внутреннем объеме располагаются источники массовой концентрации горючего и его субстанциональных свойств (поз. 1). Для имитации сгорания топлива используются распределенные в зоне горения источники энергии, стоки концентрации воздуха и источники концентрации продуктов сгорания (поз. 2). Гидравлическое сопротивление, если это необходимо, моделируется стоками импульса, действующими по длине всего тракта. Разбавление образовавшейся в зоне горения газозоудушной смеси имитируется сбалансированными между собой системами стоков (поз. 3) и источников (поз. 4) массы, концентрации "чистого" воздуха, импульса и энергии. В

силу разнородности основного и эмиттированного источниками (поз. 4) в модели отображаются адекватные физическому оригиналу диссипативные процессы. Пространственный характер втекания воздуха во фронтное устройство воспроизводится действием локального стока (поз. 5) и системы сбалансированных с ним источников массы, концентрации "чистого" воздуха, импульса и энергии (поз. 6). В зависимости от конкретных конструктивных особенностей физического оригинала возможно взаимное наложение зон действия ИС (поз. 1-4, 6).

Таким образом, в терминах системы /1, (1)/ 1D модель течения в камере сгорания ( $K=1$ ) описывается с использованием ИС - "свободных" ( $\vec{\lambda}_{(n)}$ ) и связанных с переносом массы всей среды ( $\vec{\Phi}_{(n)}$ ),  $n=1, \dots, M$ ;  $M=6$ . (Индекс единственного направления в пространстве опущен). Интенсивности ИС (поз. 1-6) переменны во времени.

Решение системы уравнений /1, (1)/ -  $\vec{P}(x, t)$  - при наличии соответствующих условий однозначности /1, (4)-(12)/, для подмодели контура вторичного воздуха отыскивается в некоторой прямоугольной зоне фазовой плоскости (рис. 2). Левая граница (CF) определяется координатой входа ( $x=0$ ) и соответствует сопряжению с проточной частью компрессора. Правая граница (DE) задается координатой среза соплового аппарата ( $x=X$ ). Нижняя граница (CD) соответствует начальному моменту времени ( $t=0$ ). Верхняя граница (FE) определяется некоторым моментом времени  $t_k$ , выбор которого согласуется с практической задачей исследований. На линии (CD) задаются начальные распределения  $\vec{P}(x, 0)$ ,  $x \in [0, X]$ ; на границах (CF) и (DE) - соотношения, определяющие потоки  $\vec{\Phi}_{(n)}(x, t)$ ,  $x = x_{CF, DE}$ ,  $t \in [0, t_k]$

Представление процесса в контуре первичного воздуха в фазовой плоскости выглядит аналогично, за исключением того, что на нижней

границе задаются условия торможения потока глухой стенкой в виде точного решения /7/ или изэнтропического приближения /6/ известной автотомодельной задачи.

Процесс горения топлива определяется следующими факторами: мгновенно-локальным состоянием течения  $\vec{P}(x, t)$  и интенсивностью источников массы, концентрации и субстанциональных свойств горючего (поз. 1, рис. 1), имитирующих его впрыск:

$$\frac{d\vec{P}^{(1)}}{dx} = \frac{G}{h} (1, \vec{C}_{(1)}, \epsilon_{(1)}^3, 0, 0), \quad (1)$$

где (см. обозначения, принятые в /1/)

$$\vec{C}_{(1)} = (0, 1, 0, S_{(1)}). \quad (2)$$

Иными словами, используются следующие допущения:

- 1) источник, имитирующий работу форсунки, распределен в полосе шириной  $h$ ;
- 2) поступающей массе горючего приписываются полная внутренняя энергия и энтропия основного течения, на фоне которого действует источник;
- 3) импульс поступающей массы горючего пренебрежимо мал.

Кинетика горения топлива непосредственно зависит от концентраций продуктов сгорания в составе топливо-воздушной смеси  $\{\omega_{п.с}(x, t)\}$  и горючего  $\{\omega_r(x, t)\}$ , а также индивидуального времени пребывания каждой лагранжевой массы горючего, отсчитываемым с момента впрыска:

$$\tilde{t}(x, t) = t - t_{впр}. \quad (3)$$

Причем,  $\tilde{t} = 0$  устанавливается синхронно эмиссии соответствующей порции горючего в поток источником (поз. 1, рис. 1). В силу одномерности принятой модели исключена возможность перемешивания нескольких порций горючего с различными индивидуальными временами.

Предполагается, что кинетика выгорания горючего подчиняется

известной зависимости вида

$$X_T = X_T(\tilde{t}), \quad X_T \in [0,1], \quad (4)$$

где  $X_T$  - массовая доля топлива, сгоревшего к индивидуальному времени  $\tilde{t}$ . Тогда, интенсивности источников энергии и концентрации продуктов сгорания определяются следующими соотношениями:

$$\Delta_E = \xi \text{Nu} A \rho_r, \quad (5)$$

$$\Delta_\omega = L_o \rho_r, \quad (6)$$

$$\text{где } \rho_r = \frac{d(\rho_\omega X_T)}{d\tilde{t}}, \quad (7)$$

$\xi$  - коэффициент полноты сгорания;  $\text{Nu}$  - низшая теплотворная способность топлива;  $L_o$  - стехиометрический коэффициент.

В качестве (4) целесообразно использовать известную формулу Висе (2) /8/:

$$X_T = 1 - \exp [C(\tilde{t}/t_z)^{m+1}], \quad (8)$$

где  $t_z = 0,038 D_{к.с}^{0,67}$  - время полного сгорания топлива /9/;

$D_{к.с}$  - диаметр камеры сгорания;

и, согласно /8/:  $m \in [-0,3, 0,7]$ ;

$C = \ln(1 - X_{Tz})$  - константа, выраженная через долю топлива.

$X_{Tz}$ , выгоревшей к моменту  $t_z$ .

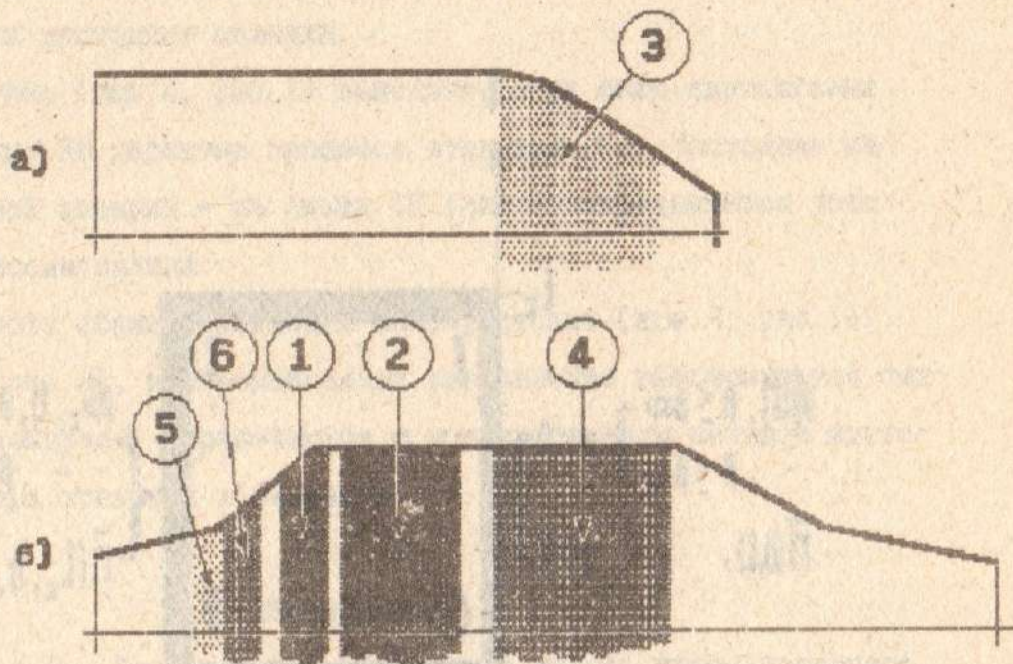
По достижении значения  $\tilde{t} = t_z \omega_r$  - обнуляется.

Для учета возможности перемешивания нескольких порций горючего с различными индивидуальными временами можно применить принцип суперпозиции соответствующих процессов.

Численный метод, реализующий модель процесса в камере сгорания, складывается из методов расчета составляющих течений - основного и вызванных действием ИС (поз. 3-8, рис. 1), объединяемых явной разностной схемой.

Интенсивности источников массы топлива, его концентрации и суб-

Схема расположения ИС, имитирующих процесс в камере сгорания



а, б - геометрические подобласти подмоделей трактов вторичного и первичного воздуха соответственно;

1 - источник массы и субстанциональных свойств горючего;

2 - источники энергии и концентрации продуктов сгорания;

3, 4 - стоки } массы (субстанциональных свойств), импульса  
5, 6 - источники } и энергии.

Рис. 1.

Область решения задачи о нестационарном движении среды  
в камере сгорания

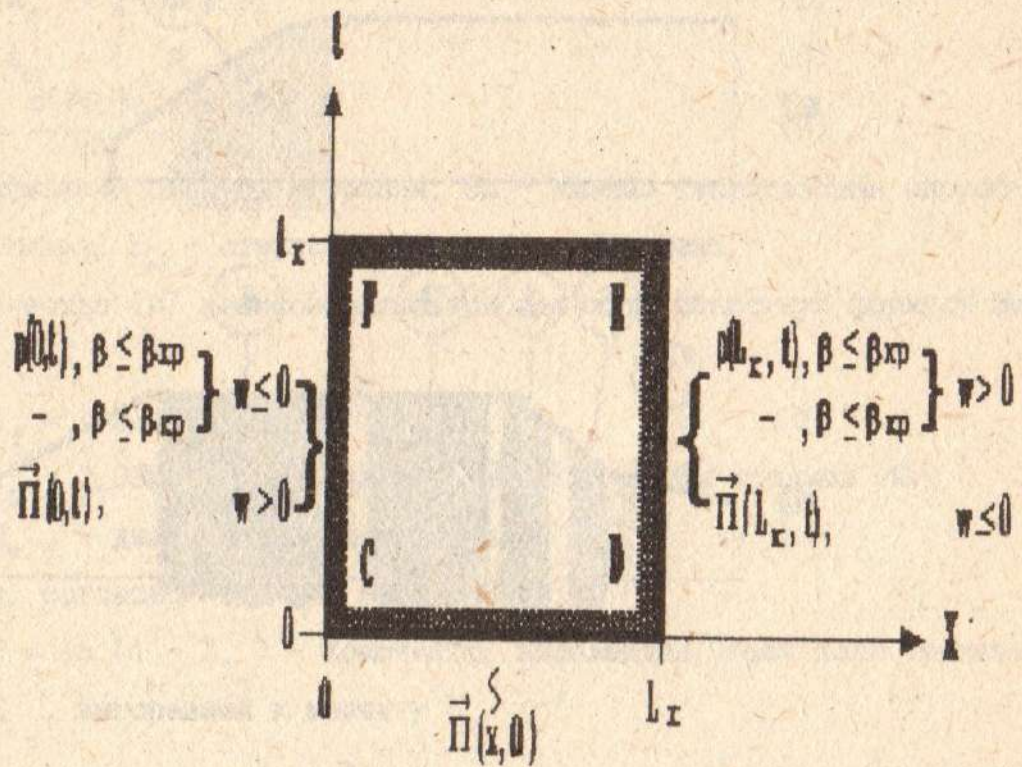


Рис. 2

станциональных свойств (поз. 1, рис. 1) определяются условиями конкретной задачи исследований. Как правило, задается закон подачи горючего  $G_f$ .

Интенсивность стока (поз. 3, рис. 1) находится из условия пропорциональности расходов первичного и вторичного воздуха площадям соответствующих проходных сечений.

Расчет стока (поз. 4, рис. 1) выполняется на базе двухшаговых схем, имитирующих 3D характер процесса втекания /б/. Состояние на входе в сопловой аппарат - на линии CF (рис. 2) определяется условиями задачи исследований.

Интенсивности сбалансированных систем стоков (поз. 3, рис. 1) и источников (поз. 4), воспроизводящих разбавление газовой смеси вторичным воздухом, определяются с использованием методов имитации 3D характера втекания и смешения /б/.

#### Литература

1. Амброжевич А. В., Костенко П. П. Целостная модель нестационарного газодинамического процесса в газотурбинном двигателе. Авиационно-космическая техника и технология. Тр. ХАИ им. Н. Е. Жуковского 1993 года, - Харьков, 1994, с. 139-146.
2. Мунштуков Д. А., Амброжевич А. В. Приближенная модель нестационарных пространственно неоднородных течений в решетках лопаточных машин. - В кн.: Энерг. машиностроение. - Харьков, 1988, вып. 46, с. 13-18.
3. Амброжевич А. В., Мунштуков Д. А. Модель нестационарного пространственно неоднородного течения в радиально-осевой лопаточной машине. - В кн.: ИВУЗ. Авиационная техника. N 2, - Казань,



1992, с. 44-47.

4. Амброжевич А. В. Численный метод реализации плоской модели течения среды в решетке лопаточной машины. - В кн.: Энерг. машиностроение. - Харьков, 1988, вып. 46, с. 93-99.
5. Амброжевич А. В. Численная реализация двумерной модели нестационарного течения в радиально-осевой лопаточной машине. - В кн.: ИВУЗ. Авиационная техника. N 3, -Казань, 1992, с. 33-37.
6. Мунштуков Д. А., Амброжевич А. В. Одномерная модель газодинамического процесса в камере сгорания периодического действия. В кн.: Газовая динамика двигателей и их элементов. - Харьков, 1987, с. 106-115.
7. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. - М.: Наука, 1977, -440с.
8. Двигатели внутреннего сгорания. Под ред. Орлина А. С., Круглова М. Г. М.: "Машиностроение", 1983, -375с.
9. Richardson I. S., Art D. W., Blair G. P. A Computer Model of a Pulsejet Engine. -SAE Techn. Pap., Ser. N 820953, -1982, -28p.

УДК. 621.438

А.Н. БУТЕНКО, Ю.И. ДЫШЛЕВОЙ, Е.М. КРАВЦОВ, В.Н. КУЛЕШОВ,  
АНАНЬЕВ В.Г., Е.С. ЧИСТЯКОВ

#### ИЗМЕРЕНИЕ ГАЗСОДЕРЖАНИЯ В МАСЛОСИСТЕМАХ ГТУ

Одной из важнейших систем, определяющих нормальное и надежное функционирование авиационного ГТД на всех режимах его работы, является маслосистема двигателя. При форсировании двигателя по параметрам термодинамического цикла в маслосистеме протекает масляно-воздушная смесь, объемное газосодержание которой может меняться от 0 до 1. В таких газожидкостных средах скорость звука намного ниже скорости звука в каждой из отдельных фаз 1. Поэтому