

Амброзевич А. В. ; Костенко П. П.

ЦЕЛОСТНАЯ МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ГАЗОТУРБИННОМ ДВИГАТЕЛЕ

Проблему синтеза целостных моделей нестационарного газодинамического процесса во всем тракте ГТД следует рассматривать, как наиболее сложную в классе аналогичных проблем для ДВС других типов, в силу громоздкости и "тонкости" расчетных сеток, необходимых для непосредственного отображения геометрии решеток многоступенчатых лопаточных машин (ЛМ), что влечет за собой соответствующие ограничения на величину предельно допустимого временного шага, а также существенно большими (по сравнению турбопоршневыми двигателями) характерными временами переходных процессов ввиду высокой механической и газодинамической инерционности роторов. На данном этапе развития ЭВМ построение реализуемых целостных моделей нестационарных течений в ГТД возможно лишь на основе применения метода особенностей, позволяющего избежать безнадежно громоздких детальнейших описаний геометрии проточной части ЛМ, тонких структур турбулентных течений и др., но, в то же время, дающего практически приемлемые для решения поставленной проблемы содержательность и точность результатов.

В основе "элементной базы", применяемой для синтеза целостной модели течения в ГТД с крупномасштабной нестационарностью, лежит единый универсальный подход /1-6/, в соответствии с которым в форме источников-стоков (ИС) массы всей среды в целом, отдельных ее компонентов и функций субстанциональных свойств, импульса и энергии, переменных в пространстве и во времени, представляются факторы, обуславлива-

ище нарушение изолированности течения: подвод теплоты и изменение концентраций компонентов среды при сгорании топлива, теплообмен между газозадушной смесью и элементами тракта, действие центробежных и кориолисовых сил, реакция решеток профилей на поток среды, диссипативные явления. В элементах газозадушного тракта - камерах сгорания (КС) и ЛМ из соображений экономичности применяются 1D и 2D подмодели, математическим описанием которых является система, составленная из уравнений массы, переноса субстанциональных свойств, импульса и энергии:

$$\frac{\partial \vec{F}}{\partial t} = - \sum_{n=0}^M \left\{ \frac{1}{R} \left[\sum_{k=K}^2 \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\vec{\Phi}_{(n,k)} R^{k-1} \right) + \vec{\Delta}_{(n)} \right] \right\}, \quad (1)$$

где $K = \left\{ \begin{array}{l} 2 - \text{для 1D-подмодели} \\ 1 - \text{для 2D-подмодели} \end{array} \right\}$ - индекс начального нетривиального направления, начиная с которого определяется подмодель;
 k - индекс направления в пространстве; M - максимальное число групп ИС, для которых возможно взаимное наложение в пространстве и во времени; n - индексы потоков (основного, если $n=0$, или вызванных действием ИС N $n \geq 1$); $R=R(x_2)$ - локальное значение радиуса среднемеридиональной поверхности; $\vec{F} = PA \{ 1, \vec{C}, \epsilon^*, w_1, w_2 \}$;
 $\vec{\Phi}_{(n,k)} = \left(\vec{F} w_k + PA \{ 0, 0, w_k, \delta_{1,k} \delta_{n,0}, \delta_{2,k} \delta_{n,0} \} \right)_{(n)}$; P - давление,
 T - температура, w_1, w_2 - компоненты вектора скорости;
 $\vec{C} = (\omega_{n,c}, \omega_r, \xi, S)$ - функции переносимых потоком среды субстанциональных свойств; $\omega_{n,c}, \omega_r$ - массовые концентрации продуктов сгорания и горючего; ξ - индивидуальное время лагранжовой частицы, несущей заряд горючего, продуктов сгорания и воздуха; A - толщина слоя среды в 2D или площадь проходного сечения канала в 1D подмоделях; $\delta_{...}$ - символ Кронекера; $\vec{\Delta}_{(0)} = \left\{ 0, 0, 0, \frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2} \right\} (AR^{k-1})$;
 $\vec{\Delta}_{(n)} = \left\{ 0, \Delta_c, \Delta_1, \Delta_{1_1}, \Delta_{1_2} \right\}_{(n)}$; $\Delta_1, 1 \equiv (C, 1, I_1, I_2)$ - объемные интенсивности "свободных" ИС, т.е. обусловленных значениями

концентраций компонентов вследствие химических реакций, энергии и импульса, не связанных с переносом массы всей среды; ε^* - полная внутренняя энергия.

Система (1), замыкаемая набором связей, составленным из термического и калорического уравнений состояния, соотношения Майера, предположения о массовой аддитивности свойств смеси, соотношений, определяющих интенсивности ИС и краевых условий, решается конечно-разностным методом, в основе которого лежат принцип расщепления по физическим процессам и модифицированная схема "распада разрыва".

Для адекватного отображения 3D характера явлений, происходящих в зонах с резким изменением геометрии проточной части (в районе входных устройств, фронтальных устройствах КС) используются имитаторы пространственного характера течений [1,2], позволяющие избежать использования априорной информации наподобие коэффициентов расхода.

Диссипативные процессы отображаются в виде стоков импульса, действующих вдоль всего тракта, задаваемых явно или неявно (путем компенсации избыточной аппроксимационной вязкости [3-6]).

Подмодель процесса в КС воспроизводит в форме ИС следующие процессы: впрыск горючего, подвод теплоты и изменение концентраций компонентов среды, действие гидравлического сопротивления, течения в местах резкого изменения площади поперечного сечения проточной части, подвод вторичного воздуха. Течение в камере сгорания представляется в виде потоков вторичного и первичного воздуха. В соответствии с конкретным конструктивным исполнением камеры в ее внутреннем объеме располагаются источники массовой концентрации горючего и его субстанциональных свойств. Для имитации сгорания топлива используются распределенные в зоне горения источники энергии, стоки концентра-

ции воздуха и источники концентрации продуктов сгорания. Разбавление образовавшейся в зоне горения газовой смеси имитируется сбалансированными между собой системами стоков и источников массы, концентрации "чистого" воздуха, импульса и энергии. Пространственный характер втекания воздуха во фронтальное устройство воспроизводится действием локального стока и системы сбалансированных с ним источников массы, концентрации "чистого" воздуха, импульса и энергии.

Процесс горения топлива определяется следующими факторами: мгновенно-локальным состоянием течения и интенсивностью источников массы, концентрации и субстанциональных свойств горючего ($\vec{C}_{(i)}$), имитирующих его впрыск: $\frac{d\vec{\Phi}_{(i)}}{dx} = \frac{G}{h} (1, \vec{C}_{(i)}, \epsilon_{(i)}^3, 0, 0)$, где $\vec{C}_{(i)} = \{0, 1, 0, S_{(i)}\}$. Иными словами, используются следующие допущения: источник, имитирующий работу форсунки, распределен в полосе шириной h ; поступающей массе горючего приписываются полная внутренняя энергия и энтропия основного течения, на фоне которого действует источник; импульс поступающего заряда горючего пренебрежимо мал. Кинетика горения топлива непосредственно зависит от концентраций продуктов сгорания в составе топливо-воздушной смеси ($\omega_{n,c}(x,t)$) и горючего ($\omega_r(x,t)$), а также индивидуального времени пребывания каждой лагранжевой массы горючего, отсчитываемым с момента впрыска: $\tau(x,t) = t - t_{\text{впр}}$. Интенсивности ИС, имитирующих горение определяются согласно 2/.

Применяемый для решения поставленной задачи синтеза метод моделирования процессов в решетках ЛМ 3-6/, построенный на приближении 2D несущего диска конечной толщины, универсален и пригоден для расчета любых физически реализуемых режимов течения.

Для всего многообразия задач целостного моделирования течений с крупномасштабной нестационарностью в ГТД в качестве решающего

фактора, позволяющего существенным образом упростить решение, следует указать свойство симметрии процессов в отдельных элементах проточной части.

Варианты схемы модели течения по тракту ГТД, лишенного свойств симметрии, представлены на рис. В геометрической подобласти решения уравнений 2D подмодели многоступенчатой турбины (поз.1) находится соответствующий числу сопловых и рабочих решеток набор объемных имитаторов Ω_{CA}^T , Ω_{PK}^T взаимодействия профилей с потоком /3,4/. Совершенно аналогична подобласть 2D подмодели многоступенчатого компрессора (в общем случае осецентрибежного), включающей объемные имитаторы входного направляющего аппарата ($\Omega_{ВНА}^K$), рабочих колес (Ω_{PK}^K) и промежуточных направляющих аппаратов ($\Omega_{ПНА}^K$). Вид подобласти КС определяется типом последней: в случае трубчатокольцевой КС — 2D подмодель (поз. 2a); кольцевой — 2D подмодель (поз. 2b) со сплошной полосой размещения ИС, имитирующих горение; индивидуальных КС — 1D подмодель (поз. 2c). Вдоль соответствующих линий сопряжения задаются условия непрерывности потоков в меридиональном направлении. Для реализации рассмотренной выше модели процесса в ГТД, ввиду высокой ресурсоемкости необходимы, как минимум, высокопроизводительные ПЭВМ класса IBM PC/AT-486. В качестве примера такого рода задачи можно назвать расчет течения в ГТД при попадании в спутную струю.

Случай, когда течениям присуще свойство симметрии, позволяют построить целостную модель течения, на несколько порядков более экономичную по сравнению с предыдущей за счет задания 2D подмоделей турбины и компрессора на ленточной подобласти шириной в единственный шаг. Логическим завершением такого рода упрощений является использование вне зависимости от конструктивных особенностей объекта исследований 1D

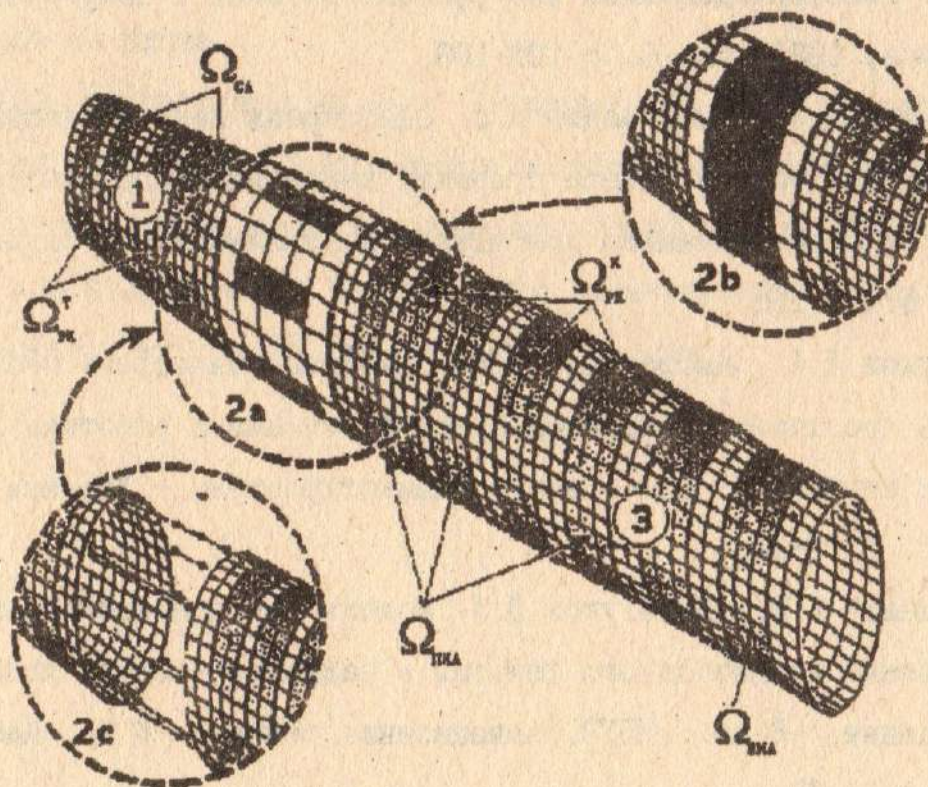
подмодели КС. Данный вариант модели вполне пригоден для реализации на ПЭВМ РС/АТ-286 и позволяет решать ряд важных практических задач моделировании процесса в ГТД на переходных режимах работы с однородным полем параметров на входе.

В дальнейшем планируется на базе последнего из рассмотренных вариантов модели разработать программное обеспечение вычислительного эксперимента, позволяющего решать задачи поузловой увязки ГТД на стадии эскизного проектирования и имитации его характеристик, необходимых для разработки электронных систем регулирования.

Литература

1. Мунштуков Д.А., Амброжевич А.В. Одномерная модель нестационарного движения двухкомпонентной среды в канале с диафрагмой. В кн.: Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках. - Харьков, 1984, вып. 6, с. 101-108.
2. 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.
3. 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.
4. Амброжевич А.В., Мунштуков Д.А. Модель нестационарного пространственно неоднородного течения в радиально-осевой лопаточной машине. - В кн.: ИВУЭ. Авиационная техника. N 2, - Казань, 1992, с. 44-47.
5. 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.
6. Амброжевич А.В. Численная реализация двумерной модели нестационарного течения в радиально-осевой лопаточной машине. - В кн.: ИВУЭ. Авиационная техника. N 3, - Казань, 1992, с. 33-37.

Структурная схема геометрической подобласти решения системы уравнений модели процесса в ГТД



- 1 - подобласть 2D-подмодели многоступенчатого компрессора;
 2a - подобласть 2D-подмодели трубчато-кольцевой КС;
 2b - подобласть 2D-подмодели кольцевой КС;
 2c - подобласти 1D-подмоделей индивидуальных КС;
 3 - подобласть 2D-подмодели многоступенчатой турбины.

Зоны действия объемных имитаторов решеток:

$\Omega_{PK}^T, \Omega_{CA}$ - рабочих колес и сопловых аппаратов турбины;

$\Omega_{ВНА}, \Omega_{ПНА}, \Omega_{PK}^K$ - входного и промежуточных направляющих аппаратов, рабочих колес компрессора.