

УДК 629.735.33

А.В. АМБРОЖЕВИЧ¹, С.Н. ЛАРЬКОВ², К.В. МИГАЛИН³¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина²Производственное объединение «Коммунар», Украина³ООО НПФ «РОТОР», Россия

ТЕХНОЛОГИЯ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ С БЕСКЛАПАННЫМИ ПУЛЬСИРУЮЩИМИ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Представлена технология опережающих численных исследований рабочего процесса в транспортной системе (ТС) с бесклапанным пульсирующим воздушно-реактивным двигателем (ПуВРД), состоящая из физико-математической модели, метода численного решения системы уравнений модели и средств программной реализации. Модель отображает комплекс взаимосвязанных базовых факторов рабочего процесса в ТС с бесклапанным ПуВРД, включая пространственные волновые явления, горение топливо-воздушной смеси и динамику полета и др. Модель имеет «открытую» архитектуру, основывающуюся на методе особенностей, а ее ресурсоемкость ориентирована на обычные ПЭВМ.

Ключевые слова: технология опережающих численных исследований, транспортные системы, бесклапанные пульсирующие воздушно-реактивные двигатели.

Введение

Несмотря на солидную предысторию, множество термогазодинамических предпочтений и внешнюю простоту конструкции, тепловые двигатели периодического действия с волновыми явлениями в качестве доминирующего фактора рабочего процесса распространения не получили. В качестве главной причины задержки прогрессивного развития на данном направлении авторы усматривают непригодность традиционного расчетного инструментария, базирующегося на неадекватных физике процесса квазистационарных представлениях, принятых в классической теории двигателей. Таким образом, дело здесь в несовершенстве информационной компоненты современных технологий процесса проектирования. Как показала практика, получившие широкое распространение в настоящее время прикладные пакеты программ универсального назначения, как то «Flow Works», «Fluind» и др. необходимыми для решения подобного класса задач адаптивными возможностями не обладают. Тем не менее, на данном этапе развития вычислительной техники и численных методов решения уравнений механики сплошных сред проблема создания соответствующих технологий опережающих исследований рабочего процесса не является неразрешимой, что продемонстрировано на ряде практических примеров комплексного моделирования рабочих процессов в двигателях периодического действия различных типов на основе метода особенностей [1 – 3 и др.].

К указанному проблемному классу следует отнести и задачу исследований, состоящую в создании математико-информационных средств моделирования рабочего процесса свободнолетающей транспортной системы (ТС) с бесклапанным ПуВРД. Нестационарные эжекционные эффекты, тороидальные вихри, интерференция струй, эффект экрана вблизи поверхности земли и пр. представляют собой доминирующие факторы, определяющие динамику вертикального взлета ТС с ПуВРД. В связи с этим для обеспечения адекватности метода расчета интегральных характеристик ТС подобного класса, как, впрочем, и любого ЛА с ПуВРД, необходимы комплексно-сопряженные модели внешнего и внутреннего обтекания, учитывающие пространственно-временную неоднородность физических полей в области пространства, вовлеченной в процесс движения. В качестве ближайшего аналога для решения поставленной задачи следует рассматривать технологию опережающих исследований процесса в ПуВРД с механическим клапаном [2]. Важной отличительной особенностью моделируемого объекта в данном случае является отсутствие осевой симметрии, что делает нецелесообразным применение цилиндрических координат и полностью исключает переход к экономичным 2D моделям.

Поставленная задача исследований потребовала разработки специальной технологии опережающих численных исследований, включающей в себя триаду: «модель → численный метод → средства программной реализации». В предлагаемой статье

содержится описание указанных составляющих технологии численных исследований рабочего процесса ТС с бесклапанным ПуВРД и приведен демонстрационный пример двигателя типа «ThermoJet».

1. Модель ТС с бесклапанным ПуВРД

Процесс свободного полета ТС с ПуВРД отображается полностью замкнутой нестационарной 3D моделью в прямоугольной системе координат с использованием свойств геометрической симметрии физического оригинала. Модель внешнего и внутреннего обтекания задана в контрольном объеме (КО), связанном с ПуВРД (рис. 1), т.е. свободно летающим объектом, что предопределяет использование неинерциальной системы отсчета.

Процесс движения многокомпонентной среды во внешних и внутренних зонах КО характеризуется базовым набором, состоящим из двух термодинамических параметров, одного кинематического и функций субстанциональных свойств (табл. 1), что отображается в модели матрицей состояния физических полей:

$$\bar{\Pi}(\bar{x}, t) = \{p, T, \bar{w}, \bar{C}\}(\bar{x}, t). \quad (1)$$

Возможно использование отличной от (1) покомпонентной записи матрицы $\bar{\Pi}$. Связь между вариантными формами покомпонентной записи определяется термическим уравнением состояния. По аналогии с [1 – 3] модель построена на основе метода особенностей вида источников–стоков (ИС) массы, импульса и энергии. Математическое описание модели представлено в векторно-матричных терминах:

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial t} + \bar{V} \bar{\Phi} = \sum_{n=1}^{M_M} \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial t} \right)_{(n)} + \sum_{n=1}^{M_c} \bar{\Delta}_{(n)}, \quad (2)$$

где $\bar{F} = \rho \{1, \bar{C}, \bar{w}, \varepsilon^0\}$ – обобщенные потоковые век-

тор-матрицы;

$$\bar{\Phi} = \sum_{k=1}^3 \bar{i}_k \bar{\Phi}_k - \text{вектор-матрица конвективных и}$$

волновых процессов; \bar{i}_k – орты прямоугольной системы координат;

$$\bar{\Phi}_k = \bar{F} w_k + p \{0, 0, 0, 0, \delta_{1,k}, \delta_{2,k}, \delta_{3,k}, w_k\} -$$

проекция вектор-матрицы конвективных и волновых процессов на оси координат;

$$\bar{\Delta}_{(n)} = \left\{ 0, \frac{\partial(\rho \bar{C})}{\partial t}, \bar{f}, \frac{\partial(\rho \varepsilon^0)}{\partial t} \right\}_{(n)} - \text{вектор-}$$

матрица «свободных» ИС;

M_M – общее число групп ИС, обусловленных субстанциональным переносом;

M_c – общее число групп «свободных» ИС, (n) – индексы групп ИС.

Система (2) замыкается уравнением состояния идеального газа $p = \rho RT$, предположением об аддитивности теплофизических свойств среды, соотношения, определяющие интенсивности ИС:

$$\left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial t} \right)_{(\beta)} = f_{\beta}(\bar{\Pi}, x_1, x_2, x_3, t), \quad \beta = 1, \dots, M_M; \quad (3)$$

$$\bar{\Delta}_{(\gamma)} = f_{\gamma}(\bar{\Pi}, x_1, x_2, x_3, t), \quad \gamma = 1, \dots, M_c \quad (4)$$

начальными и граничными условиями:

$$\bar{\Pi} = \bar{\Pi}(x_1, x_2, x_3, 0), \quad \{x_1, x_2, x_3\} \in \Omega, \quad (5)$$

$$\bar{\Pi} = \bar{\Pi}(x_1, x_2, x_3, t), \quad \{x_1, x_2, x_3\} \in \Gamma, \quad \forall t. \quad (6)$$

В соответствии с методом особенностей, совокупность доминирующих факторов модели представляется аппликацией источников-стоков (ИС) материальных субстанций двух типов: связанных с массопереносом (3) и «свободных» (4) (табл. 2).

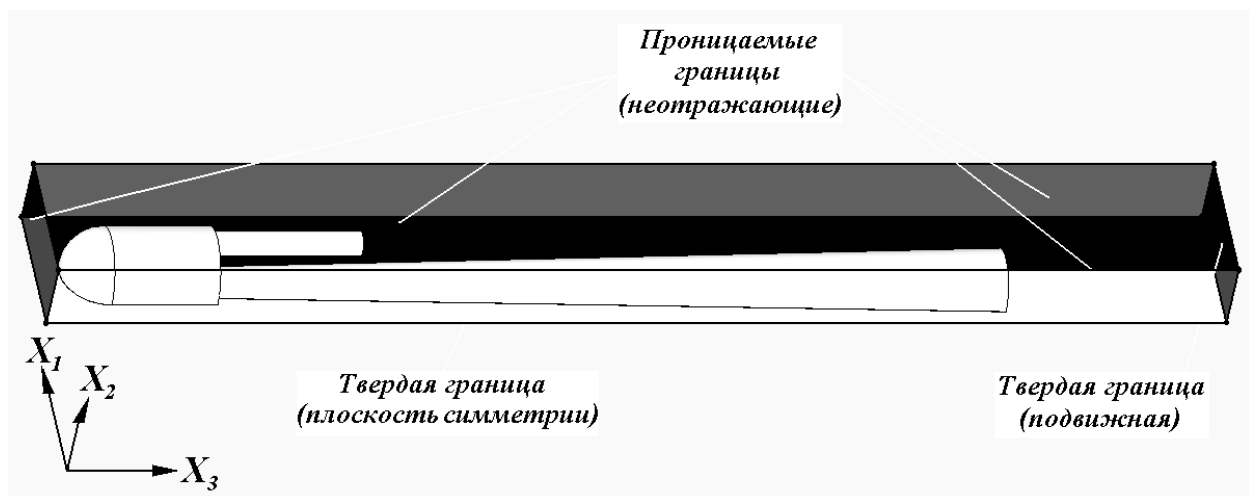


Рис. 1. Контрольный объем, заключающий в себя ТС с ПуВРД

Таблица 1
Основные параметры, факторы и функции процесса внутреннего и внешнего обтекания ПуВРД

Обозначение	Физический смысл	Покомпонентная форма записи
t	время	–
\vec{x}	координатный вектор	$\{x_1, x_2, x_3\}$
p	давление	–
T	температура	–
\vec{w}	вектор скорости	$\{w_1, w_2, w_3\}$
\bar{C}	матрица функций субстанциональных свойств	$\{\omega, \omega_r, \bar{t}, S\}$
ω, ω_r	массовые концентрации продуктов сгорания и горючего	–
\bar{t}	индивидуальное время химически реагирующей частицы	–
S	энтропия	–
$\varepsilon, \varepsilon^0$	внутренняя энергия (по ст. параметрам и полная)	–
i, i^0	энтальпия (по статическим параметрам и полная)	–
\bar{f}	напряженность поля массовых сил	$\{f_1, f_2, f_3\}$

Таблица 2

«Элементная база» модели транспортной системы с ПуВРД

(n)	Характер фактора, имитируемого вектором ИС	Форма записи	Интенсивности образующих факторов (компоненты)	Механизм воздействия
1	Повышение концентрации продуктов сгорания, уменьшение концентрации горючего и подвод теплоты при сгорании топлива	$\frac{\partial(\rho\omega)_{(1)}}{\partial t}$	источника массы продуктов сгорания	субстанциональный перенос
		$\frac{\partial(\rho\omega_r)_{(1)}}{\partial t}$	стока массы горючего	
		$\frac{\partial(\rho\varepsilon^0)_{(1)}}{\partial t}$	источника энергии	
2	Тепловые потоки между газозвушной смесью и элементами тракта	$\frac{\partial(\rho\varepsilon^0)_{(2)}}{\partial t}$	источника энергии	свободный
3	Подача горючего	$\frac{\partial\rho_{(3)}}{\partial t}$	источник массы всей смеси	субстанциональный перенос
		$\left(\frac{\partial\rho}{\partial t}\omega_r\right)_{(3)}$	источника массы горючего	
4	Диссипативные силы	$\bar{\Delta I}_{(4)}$	напряженности сил трения	свободный
5	Взаимодействие с твердыми границами	$\bar{\Delta I}_{(5)}$	нормальных напряжений	
6	Направляющие свойства пристеночных зон течения	$\bar{\Delta I}_{(6)}$	напряженности поверхностных сил	
7	Действие сил инерции	$\bar{\Delta I}_{(7)}$	напряженности сил инерции	

На протяжении малых интервалов времени, ассоциированных с временными шагами, такого рода ИС полагаются автономными явлениями, к которым применим принцип суперпозиции в виде семейства параллельно–последовательных схем.

2. Подмодель горения

Кинетические модели химического взаимодействия компонентов топлив [5 и др.] описываются системами трансцендентных уравнений высокого порядка. Получение единичного результата на основе такого рода моделей для топлив типа «воздух–бензин» с условной формулой $C_\alpha H_\beta N_\gamma O_\delta$ общего вида представляет собой отдельную задачу высокой ресурсоемкости [6 – 8 и др.]. На данном этапе развития ЭВМ такая категория моделей горения не совместима с общей задачей создания комплексной модели, отображающей внешнее и внутреннее обтекание камеры ПуВРД.

Наиболее продуктивный выход из данной ситуации видится в традиционном для общей теории тепловых двигателей подходе, основанном на использовании эмпирических зависимостей типа известной формулы Вибе [9, 10] или ЦНИДИ [11]. В представленной модели процесс сгорания имитируется с использованием формулы Вибе, обеспечивающей возможность параметрической адаптации к различным условиям горения углеводородных топлив.

Для отслеживания отдельных химически реагирующих частиц в потоке наиболее удобна лагранжева система координат. На фоне основной (эйлеровой) системы координат, согласно [1, 3], химически реагирующая частица с момента инициализации может сопровождаться посредством специального субстанционального признака («индивидуального времени» – \bar{t}).

Диффузия \bar{t} , как и любого субстанционального признака, подчинена соответствующему уравнению переноса в системе (2). Данный принцип вполне удовлетворителен в тех случаях, когда моделируемый процесс не связан с интенсивным слиянием химически реагирующих частиц с различной предысторией (т.е. отличающихся значениями \bar{t}). Из области применимости данного принципа выпадает класс задач пространственных течений с неоднородным полем предысторий химически реагирующих частиц при наличии интенсивных обменных процессов. Однако, если пространственная модель процесса в камере ПуВРД использует допущение о синхронном характере инициализации горения во всем ее объеме, такой подход не вступает в противоречие с физикой. Поле \bar{t} при этом будет посто-

янным, а частицы, не содержащие инициализированных исходных реагентов, благодаря принятому виду соответствующего уравнения переноса системы, останутся нейтральными по отношению к «горящим», т.е. не повлияют на свойственные последним значения \bar{t} при слиянии.

В двигателях с самоподдерживающимся волновым характером рабочего процесса одним из важнейших факторов, влияющих на амплитудо-фазочастотные характеристики, а также принципиальную осуществимость подобных тепловых машин на заданных видах горючего, являются условия самовоспламенения. В представленной модели предпламенные процессы отображаются условием [12]:

$$I = \int \frac{1}{\tau(\alpha, p, T, ON)} dt = 1, \quad (10)$$

где I – интеграл самовоспламенения; $\tau(\alpha, p, T)$ – время задержки самовоспламенения как функция параметров: α – коэффициент избытка окислителя; p – давление; T – температура; ON – октановое число горючего.

Наиболее употребимое функциональное соотношение, связывающее время задержки самовоспламенения с параметрами горючей смеси, основывается на модели, строящейся на представлениях о накоплении свободных радикалов и достижении критической скорости реакций окисления:

$$\tau = A p^B \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right), \quad (11)$$

где A , B – эмпирические константы; E_a – кажущаяся энергия активации реакции.

Согласно [13], процесс горения предварительно перемешанной горючей смеси состоит из двух стадий: т.н. «холодного пламени» и развитого горения. В соответствии с [14], моделирование двух стадий горения с помощью формулы Вибе может осуществляться путем включения в нее дополнительной части, отражающей расширенную схему физического процесса:

$$X = 1 - \exp C \left(n_{pf} \left(\frac{t}{t_z} \right)^{m_{pf}+1} + (1 - n_{pf}) \left(\frac{t}{t_z} \right)^{m+1} \right), \quad (12)$$

где X – доля сгоревшего топлива к моменту времени t ; m_{pf} – показатель характеристики горения в предпламенных процессах; m – показатель характеристики горения основной доли топлива; n_{pf} – массовая доля топлива, окисляющегося в предпламенных процессах; t_z – продолжительность процесса сгорания; $C = \ln(1 - X_z)$ – константа, выражающая долю горючего X_z , выгорание которой является индикатором окончания процесса горения.

3. Подмодель динамики полета

Процесс движения ТС подчиняется уравнениям динамики тела переменной массы, движущегося в поле сил земного тяготения под действием несбалансированных сил, приложенных к наружным и внутренним поверхностям:

$$\frac{dM_{TC}}{dt} = - \int_{\Omega(3)} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \omega_r \right)_{(3)} dV, \quad (13)$$

$$\frac{d(M_{TC} \bar{u})}{dt} = - \int_{\sigma(5)} \bar{\Delta} I(5) \bar{n}_{(5)} d\sigma - M_{TC} \bar{g}, \quad (14)$$

$$\left(\frac{\partial \omega_n}{\partial t} \right) = \frac{M_n}{I_n}, n = 1, 2, 3, \quad (15)$$

где M_{TC} – масса ТС; \bar{u} – скорость полета; $\Omega(3)$ – зона впрыска горючего; $\bar{n}_{(5)}$ – единичный вектор внешней нормали к поверхности ТС; $\sigma(5)$ – внутренняя и внешняя поверхности ТС; \bar{g} – ускорение свободного падения; ω_n – компоненты угловых скоростей, M_n – траекторные моменты, I_n – осевые моменты инерции.

Ускоренное движение КО, включающего в себя ТС, обуславливает неинерциальный характер связанной системы отсчета:

$$\left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} \right)_{-Ин.СО} = \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} \right)_{Ин.СО} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}, \quad (16)$$

где $-Ин.СО$ и $Ин.СО$ – неинерциальная и инерциальная системы отсчета.

Ускорения (16) определяют напряженность поля сил инерции $\bar{\Delta} I(7)$ (табл. 2).

4. Разностная схема

Представление (7 – 9) органически сочетается с принципом расщепления по физическим процессам $n = 0, \dots, M$ в применении к операциям каждого временного шага. В общем случае явный разностный аналог системы (2) принимает следующий вид:

$$\bar{F}_{i_1, i_2, i_3}^{l+1} = \bar{F}_{i_1, i_2, i_3}^l + \tau \sum_{n=0}^M \left(\bar{\Lambda}_n \right)_{i_1, i_2, i_3}^l, \quad (17)$$

где « $(\dots)^l$ », « $(\dots)_{i_1, i_2, i_3}$ » – индексы временного слоя и узлов прямоугольной сетки соответственно; $\tau^l \equiv \Delta t$ – временной шаг.

Разностные аналоги $\left(\bar{\Lambda}_n \right)_{i_1, i_2, i_3}^l$ на каждом новом временном слое отвечают независимым (парал-

лельным) вычислительным шагам и находятся по состоянию предыдущего: $\bar{\Pi}_{i_1 + \sigma_1, i_2 + \sigma_2, i_3 + \sigma_3}^l$, где $\{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\}$ – относительные индексы шаблона разностной схемы шага расщепления № n .

На шаге «автономного» течения используется модифицированная схема С.К. Годунова:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\Phi}_k}{\partial x_k} \Big|_{x_1(i_1), x_2(i_2), x_3(i_3)} &\equiv \\ &\equiv \frac{1}{h_k} \sum_{\beta=-1}^1 \beta \bar{\Phi}_k^{l+\frac{1}{2}}_{i_1 + \frac{\beta \delta_{k,1}}{2}, i_2 + \frac{\beta \delta_{k,2}}{2}, i_3 + \frac{\beta \delta_{k,3}}{2}}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $h_k \equiv \Delta x_k$, $k = 1, 2, 3$ – шаги пространственной сетки.

С использованием представлений (17) и формул аппроксимации вида (18) разностная схема шага «автономного» течения:

$$\bar{F}_{i_1, i_2, i_3}^{l+1} = \bar{F}_{i_1, i_2, i_3}^{l+\frac{1}{2}} + \tau^l \left(\bar{\Lambda}_0 \right)_{i_1, i_2, i_3}^l, \quad (19)$$

где

$$\left(\bar{\Lambda}_0 \right)_{i_1, i_2, i_3}^l = - \sum_{k=1}^3 \frac{1}{h_k} \sum_{\beta=-1}^1 \beta \bar{\Phi}_k^{l+\frac{1}{2}}_{i_1 + \frac{\beta \delta_{k,1}}{2}, i_2 + \frac{\beta \delta_{k,2}}{2}, i_3 + \frac{\beta \delta_{k,3}}{2}},$$

$$\gamma = \begin{cases} 0, \{i_1, i_2, i_3\} \notin \Gamma_{\text{подв}}(t^l) \\ 1, \{i_1, i_2, i_3\} \in \Gamma_{\text{подв}}(t^l) \end{cases} - \text{параметр, управляю-}$$

щий заданием исходного состояния на подвижных границах и во всех прочих узлах расчетной сетки.

Потоки $\bar{\Phi}_k^{l+\frac{1}{2}}_{i_1 + \frac{\beta \delta_{k,1}}{2}, i_2 + \frac{\beta \delta_{k,2}}{2}, i_3 + \frac{\beta \delta_{k,3}}{2}}$ на свобод-

ных гранях внутренних и граничных ячеек сетки определяются решением задачи о распаде начального разрыва. На непроницаемых гранях используется решение задачи о взаимодействии однородного потока газа с преградой. Исходя из условий экономичности алгоритма, решения перечисленных автомодельных задач находятся в изоэнтропическом приближении в виде аналитических зависимостей.

В представленной модели ТС с ПуВРД используется принцип отображения диссипативной сигнатуры, исходящий из подтвержденного на практике предположения о подобии структур коэффициентов вязкости – физической и аппроксимационной [4, с. 103]. Диссипация в процессе обтекания внешней и внутренней поверхностей ПуВРД воспроизводится путем нормирования аппроксимационной вязкости [1, 3], что, может рассматриваться в качестве однопараметрической модели турбулентности.

Сеточное отображение топологии КО включает в себя маску, воспроизводящую проницаемость

ячеек и формирующуюся путем импорта твердотельного образа поверхностей, сгенерированного в среде проектирования, в среду применяемого алгоритмического языка. Проницаемость границы может составлять от 0,0 до 1,0, что позволяет имити-

ровать как перфорированные стенки, так и конструктивные элементы с размерами меньше шага расчетной сетки.

Вид твердотельной маски применительно к ПуВРД типа «ThermoJet» представлен на рис. 2.

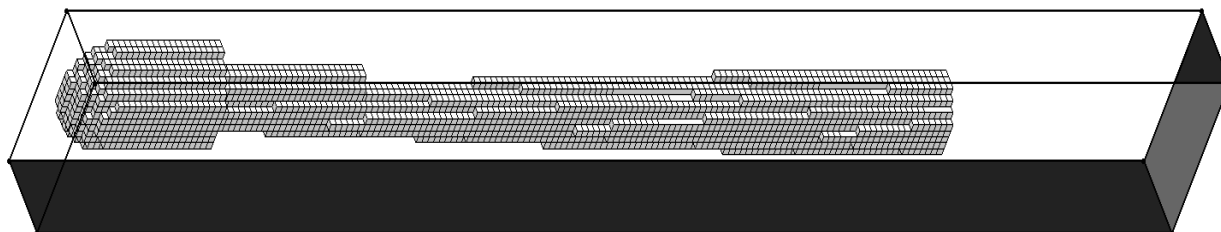


Рис. 2. Маска в сеточной области, отображающая оболочку камеры ПуВРД

5. Реализация модели

Визуализация физических полей осуществляется путем синхронного анимационного отображения их актуальных состояний в виде цветowych карт сечений КО (рис. 3). Представленная технология обеспечивает решение комплекса основных задач проектирования бесклапанных ПуВРД.

Далее приведен пример исследования рабочего процесса в ПуВРД типа «ThermoJet» с предварительной карбюризацией. Представление об основных фазах газообмена устойчивого режима работы дают серии временных срезов, снабженные соответствующими комментариями (рис. 3, где: вып. и вп. тр. – впускная и выпускная трубы; ПС – продукты сгорания; ТВС – топливо–воздушная смесь; КС – камера сгорания; $p_{КС}$ – давление в КС; $p_{атм}$ – атмосферное давление; абс. – «абсолютное»).

Средства реализации модели представляют собой авторский программный продукт, для эксплуатации которого пригодны любые версии ОС WINDOWS, поддерживающие среду алгоритмического языка FORTRAN Visual Pro.

Неотъемлемой частью технологии численных исследований являются средства визуализации, представляющие собой адаптированную к условиям физического оригинала графическую оболочку анимационного сопровождения вычислительного эксперимента в реальном масштабе времени.

Разработаны специальные средства импорта твердотельного образа камеры ПуВРД из проектной среды Solid Works с последующим преобразованием в маску, формирующую топологию контрольного объема в программной среде FORTRAN Visual Pro.

Ресурсоемкость модели ориентирована на обычные ПЭВМ класса Pentium 4 с использованием векторных команд расширения SSE II. Максимально достижимая разрешающая способность модели оценивается отображением геометрической подобласти

решения на $50 \times 24 \times 400$ расчетных ячеек, что для минимального шага по пространственной координате ~ 5 мм требует для получения решения на ~ 15 рабочих циклов двигателя 150 часов машинного времени для процессора с тактовой частотой 1,7 ГГц.

Заключение

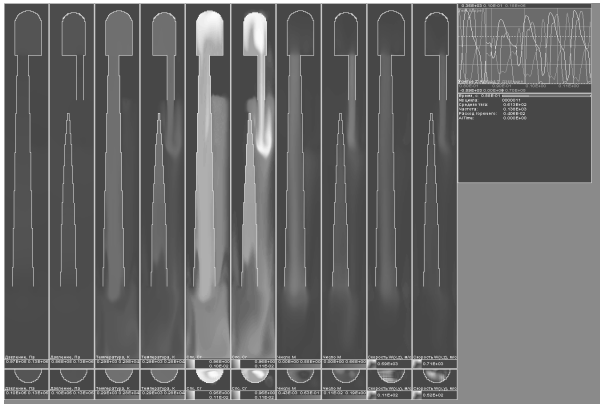
Представленная технология опережающих численных исследований универсальна и область ее применимости не ограничивается подмножеством транспортных систем с бесклапанными двигателями типа «ThermoJet».

Ресурсоемкость представленной технологии обеспечивает возможность получения дроссельных и высотно-скоростных характеристик ПуВРД на ПЭВМ ординарного класса.

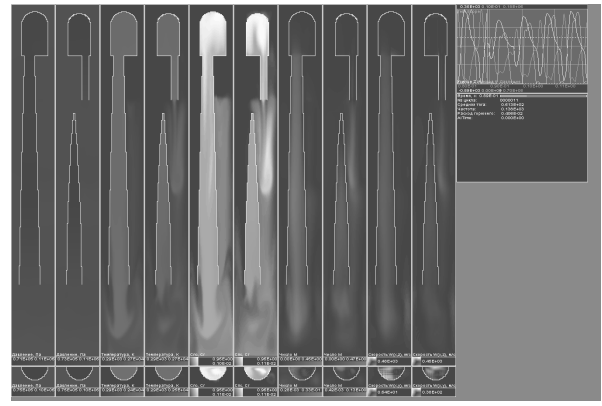
Заложенные в принципиальную основу модели возможности воспроизведения свободного полета ТС с ПуВРД в полной мере могут быть реализованы на более производительных ПЭВМ.

Литература

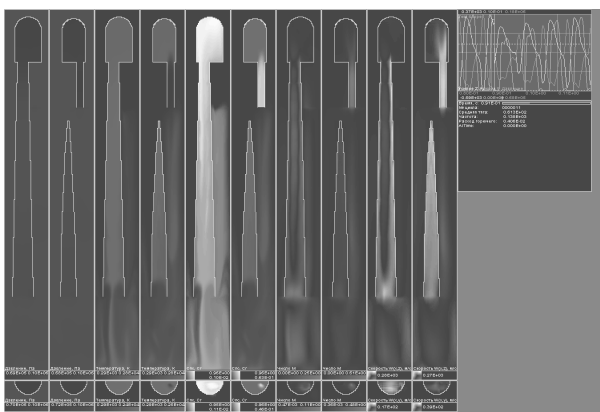
1. Амброжевич А.В. Численное моделирование комплекса нестационарных газодинамических процессов в тепловых двигателях / А.В. Амброжевич. – Х.: ХГАДТУ, 1999. – 77 с.
2. Амброжевич А.В. Комплексная математическая модель ПуВРД малой тяги / А.В. Амброжевич, С.Н. Ларьков // *Радіоелектроніка і комп'ютерні системи*. – 2004. – № 4. – С. 118–121.
3. Амброжевич А.В. Численное моделирование теплофизических процессов в двигателестроении / А.В. Амброжевич. – Х.: ХАИ, 2005. – 233 с.
4. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред / О.М. Белоцерковский. – М.: Наука, 1984. – 520 с.
5. Глушко В.П. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: Справочник в 10 т. / Под ред. В.П. Глушко. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1971–1979.



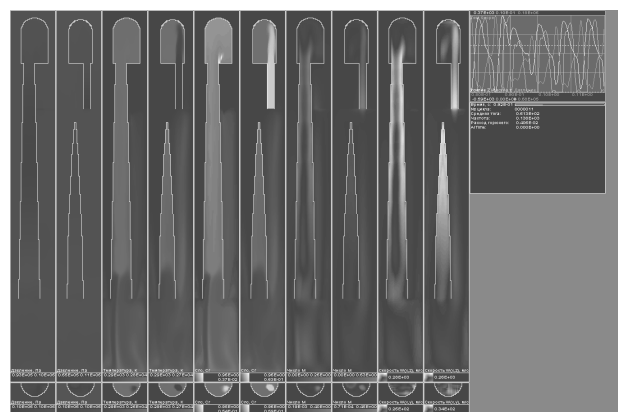
I. По окончании сгорания в вып. и вп. тр. устанавливается течение в сторону сопел; $p_{КС} > p_{атм}$



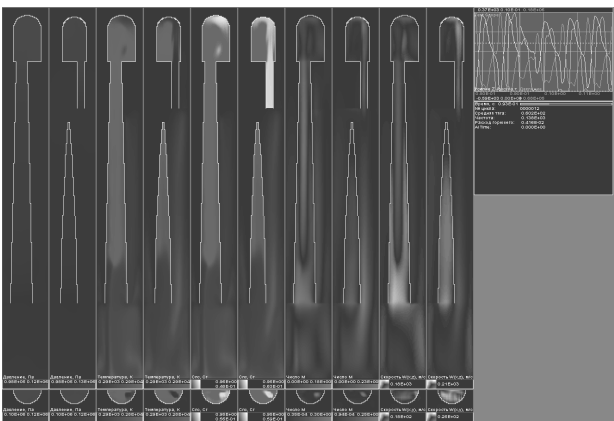
II. При истечении из сопел и падении $p_{КС}$ во вп. тр. поток тормозится. В вып. тр. силы инерции обуславливают выс. скорость ПС



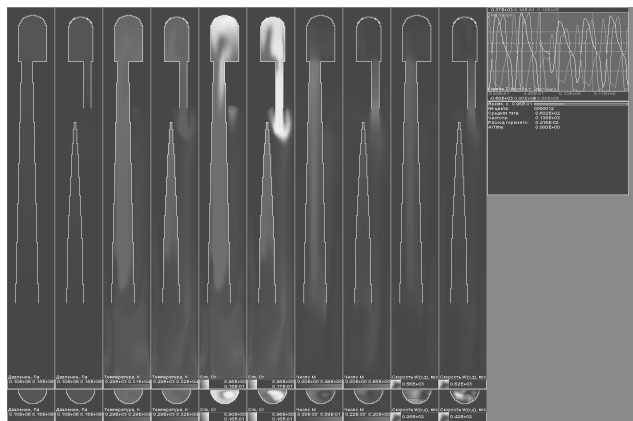
III. Торможение в вып.тр. и реверсирование во вп. тр.; $p_{КС}$ достигает абс. минимума в момент реверсирования в вып.тр. В вып. тр. сохраняется зона прямого потока и проявляется вихрь в нач. ее части



IV. С натеканием свежей ТВС и ПС из вып. тр. при $p_{КС} \approx p_{атм}$, в КС зарождаются вихр. структуры. ТВС поступает в КС двумя струями, слабо взаимодействующими друг с другом и с внутр. течениями



V. По мере роста $p_{КС}$ вследствие натекания ТВС и ПС зона вихревых структур захватывает всю КС и начальную часть вып. трубы. Обратный поток во вп. трубе тормозится. Происходит интенсивное перемешивание ТВС с ПС по всей длине поступившего заряда с последующим воспламенением смеси. Вып. труба охвачена интенсивными вих. структурами



VI. Рост $p_{КС}$ приводит к установлению во вп. и вып. тр. течения в сторону сопел. При достижении $p_{КС max}$ вихр. структуры вытесняются из ПЧ. Выгорает $\sim 2/3 \dots 3/4$ горючего. Большая часть КС охвачена процессами горения. В рез. эжекции горячей ТВС из КС в вып. тр. часть ТВС сгорает в расш. секции. Во вп. тр. со стороны стенки проникают ПС предыдущего цикла

Рис. 3. Фазы рабочего процесса в бесклапанном ПуВРД типа «ThermoJet»

6. *A Detailed Chemical Kinetic Reaction Mechanism for the Oxidation of Iso-Octane and Heptane over an Extended Temperature Range and its Application to Analysis of Engine Knock* / C.K. Westbrook, J. Warnatz etc // 22nd Symposium (Intl) on Combustion. – (893). – 1988.

7. *Kong S.C. Modeling and Experiments of HCCI Engine Combustion Using Detailed Chemical Kinetics with Multidimensional CFD* / S.C. Kong, S.D. Mariott etc // SAE 2001-01-1026.

8. *Acevs S.V. A Decoupled Model of Detailed Fluid Mechanics Followed by Detailed Chemical Kinetics for Prediction of Iso-Octane HCCI Combustion* / S.V. Acevs, J. Martines-Frias etc // SAE 2001-01-3612.

9. Орлин А.С. Двигатели внутреннего сгорания / Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1983. – 375 с.

10. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. / А.Н. Воинов. – М.: Машиностроение, 1977. – 277 с.

11. Ваншейдт М. Дизели. Справочник / Под ред. М. Ваншейдта. – М.-Л.: Машиностроение, 1964. – 559 с.

12. *Livengood J.C. Correlation of Autoignition Phenomena in Internal Combustion Engines and Rapid Compression Machines* / J.C. Livengood, P.C. Wu // Fifth Symposium on Combustion. – 1955.

13. *Jinkai Zheng. A Global Reaction Model for the HCCI Combustion Process* / Jinkai Zheng, David L. Miller, Nocolas P. Gernansky // SAE Paper № 2004-01-2950.

14. *Watson N. A Combustion Correlation for Diesel Engine Simulation* / N. Watson, A.D. Pilley, M. Marzouk // SAE Paper № 800029.

Поступила в редакцию 1.06.2010

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры аэрокосмической теплотехники А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

ТЕХНОЛОГІЯ ЧИСЕЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ З БЕЗКЛАПАННИМИ ПУЛЬСУЮЧИМИ ПОВІТРЯНО-РЕАКТИВНИМИ ДВИГУНАМИ

О.В. Амброжевич, С.М. Ларьков, К.В. Мігалін

Подана технологія випереджуючих чисельних досліджень робочого процесу в транспортній системі (ТС) з безклапанним пульсуючим повітряно-реактивним двигуном (ПуПРД), що складається з фізико-математичної моделі, методу чисельного розв'язання системи рівнянь моделі та засобів програмної реалізації. Модель віддзеркалює комплекс взаємозв'язаних базових факторів робочого процесу в ТС з безклапанним ПуПРД, охоплюючи просторові хвильові явища, горіння паливоповітряної суміші та динаміку польоту та ін. Модель має «відкриту» архітектуру, що ґрунтується на методі особливостей, а її ресурсоемність орієнтована на ординарні ПЕОМ.

Ключові слова: технологія чисельних досліджень, транспортні системи, безклапанні пульсуючі повітряно-реактивні двигуни.

A TECHNOLOGY OF NUMERICAL INVESTIGATION OF THE WORKING PROCESS OF VALVELESS PULSE JET ENGINES FOLUING VEHICLES

A.V. Ambrożewicz, S.N. Larkov, K.V. Migalin

A technology of preliminary numerical investigation of the working process of transporting system (TS) with valveless pulse jet engine (PJE), composed of physical-mathematical model, method of numerical solution of system equations of model and soft, is presented. A model is simulated a complex of mutually connected factors of the working process of the TS with PJE, including 3D wave's phenomena, air-fuel mixture combustion and flight's dynamic etc. A model has same "opened" architecture, based of the method of specifics and has resource's needing, collocated with possibilities of ordinary personal computers.

Key words: technology of numerical investigation, transporting system, valveless pulse jet engine.

Амброжевич Александр Владимирович – д-р техн. наук, профессор кафедры ракетных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Ларьков Сергей Николаевич – канд. техн. наук, Производственное объединение «Коммунар», главный технолог, Харьков, Украина.

Мигалин Константин Валентинович – канд. техн. наук, директор, ООО НПФ «РОТОР», Тольятти, Россия, e-mail: MigalinK@mail.ru.