

УДК 621.44.533.697

В.М. Лапотко, Ю.П. Кухтин, Г.И. Слынько*ГП «Ивченко-Прогресс», ЗНТУ Украина***СОПРЯЖЕННАЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВТОРОГО КОНТУРА И НАРУЖНОЙ ЧАСТИ МОТОГОНДОЛЫ ТРДД**

При построении газодинамической модели второго контура и наружной части мотогондолы ТРДД авторы исходили из эйлерово-лагранжевой формы описания осесимметричного закрученного течения среды. В представленной модели учитывался подвод импульса и энергии, происходящий в вентиляторе, а также преобразование энергии в спрямляющем аппарате второго контура. Течение рассматривалось в цилиндрической системе координат. В интегральной форме представлены уравнения, описывающие течение среды. Моделирование явлений теплообмена осуществлялось с использованием современной модели турбулентности. При построении численного алгоритма расчетная область была разделена на несколько подобластей, что позволило провести эффективное распараллеливание вычислительного алгоритма. Широко представлены результаты расчетов локальных и интегральных параметров экспериментальной модели двигателя.

Ключевые слова: численное моделирование, эйлерово-лагранжево представление, мотогондолы, сопло, сопряженный расчет.

1. Введение

Применение численного моделирования газодинамических процессов ВРД перспективных и существующих схем позволяет повысить эффективность научно-исследовательских работ за счет сокращения доли дорогостоящего, натурного эксперимента. Однако уровень развития современных компьютеров все еще не позволяет применять целостные, «точные» модели газодинамических процессов ВРД, непосредственно отображающих геометрию проточной части, тонкую структуру течений и другие факторы. Наибольшую трудность представляют задачи, когда имеет место широкомасштабность, нестационарность и пространственная неоднородность течения рабочей среды.

В связи с этим создание реализуемых на ЭВМ комплексных моделей возможно лишь на основе применения новых подходов.

2. Обозначения

P, ρ, T – термодинамические параметры: давление, плотность и температура;

W_x, W_r, W_φ – компоненты скорости в цилиндрической системе координат;

U_n – нормальная составляющая скорости движения контактного разрыва параметров;

W_n – нормальная составляющая скорости движения среды;

A – площадь поверхности;

V – объем пространства;

R – газовая постоянная;

C_v – теплоемкость среды при постоянном объеме;

$f_x^v, f_\varphi^v, f_r^v$ – объемные источники, воспроизводящие взаимодействие лопаток вентилятора и спрямляющего аппарата с рабочей средой;

x, r, φ – компоненты цилиндрической системы координат;

\bar{n}_x, \bar{n}_r – проекции на координатное направление единичных нормалей к поверхности;

T_u – степень турбулентности;

α – угол входа потока;

P_a, T_a – давление и температура на свободной границе;

N – количество лопаток в венце;

ω – частота вращения ротора;

k – энергия пульсационного движения;

ε – диссипация энергии пульсационного движения;

M – число Маха;

G – расход среды;

η – коэффициент полезного действия.

3. Описание модели

При построении настоящей газодинамической модели предполагалось, что течение рабочей среды в рассматриваемых технических устройствах может быть хорошо описано как осесимметричное, закрученное, в эйлерово-лагранжевой форме представления [1]. Течение среды внутри второго контура, течение с наружной части мотогондолы, а также течение на входе и выходе первого контура ТРДД, рассматриваются как единый нестационарный газодинамический процесс.

В предлагаемой газодинамической модели учитывался подвод импульса и энергии, про-

исходящие при вращении колеса вентилятора. Также учитывался процесс преобразования энергии, который имеет место в зоне расположения спрямляющего аппарата. Указанные процессы воспроизводились лишь объемными источниками f_x^v, f_ϕ^v, f_r^v , интенсивности которых получены при рассмотрении взаимодействия

лопаток рабочего колеса и спрямляющего аппарата с осесимметричным закрученным течением газа.

Основная система уравнений для течения газа, лишенного вязкости, в цилиндрической системе координат (x, r, ϕ) , с учетом указанных допущений, представляется в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV &= - \int_A \rho (W_n - U_n) dA, \\ \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho W_x dV &= - \int_A \rho (W_n - U_n) W_x dA - \int_A P \bar{n}_x dA + \int_V f_x^v dV, \\ \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho W_r dV &= - \int_A \rho (W_n - U_n) W_r dA - \int_A P \bar{n}_r dA + \int_V f_r^v dV + \int_V f_r^v dV, \\ \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho (W_\phi r) dV &= - \int_A \rho (W_n - U_n) (W_\phi r) dA + \int_V f_\phi^v r dV, \\ \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \left(C_v T + \frac{W^2}{2} \right) dV &= - \int_A \rho (W_n - U_n) \left(C_v T + \frac{P}{\rho} + \frac{W^2}{2} \right) dA + \int_V (r_x^v W_x + f_\phi^v W_\phi + f_r^v W_r) dV, \\ P &= \rho RT. \end{aligned} \tag{1}$$

Явления тепломассообмена, обусловленные турбулентным движением среды, воспроизводились потоками массы, импульса и энергии [2]. Для этого исходная система уравнений (1) дополнялась двумя уравнениями, являющимися аналогом уравнений, лежащих в основе известной k, ϵ - модели турбулентности. Кроме того, в правых частях всех уравнений системы (1) появлялись источники членов, воспроизводящие явления тепломассообмена.

При численной реализации предложенной модели большое внимание уделялось эффективности проводимых вычислений и возможности осуществления быстрой адаптации модели для конкретного двигателя. С этой целью расчетная область разбивалась на несколько подобластей, в которых располагались определенные составные элементы двигателя и мотогондолы. Указанные подобласти могут быть обработаны на параллельной вычислительной системе в рассматриваемый момент времени независимо друг от друга.

В качестве метода решения описанной системы уравнений был использован метод установления С.К. Годунова, развитый авторами настоящей работы для расчета течений газа в эйлерово-лагранжевом представлении [1].

4. Расчетная область и краевые условия

На рис. 1 показана расчетная область, состоящая из некоторой части внешнего пространства, внешней части мотогондолы, тракта

второго контура и сопла первого контура экспериментальной модели двигателя.

В качестве исходных геометрических параметров в представленной модели, помимо обводов тракта, необходимо определить геометрические формы профилей лопаток вентилятора и спрямляющего аппарата.

Внешние краевые условия. На свободных границах задавалось условие $P = P_a$. На границе входа задавалось условие $M = M_\infty$.

Внутренние краевые условия. На непроницаемых поверхностях задавалось условие прилипания. На вертикальных, неподвижных поверхностях стыка 4-5, 5-6, 6-7, 7-2, необходимо было обеспечить стыковку решений. Такая стыковка решений состояла в обеспечении консерватизма потоков параметров, а также в сохранении параметров поля на поверхностях стыка. На поверхностях стыка 1-2, 2-3, 3-4 выполнялись условия, соответствующие поверхностям контактного разрыва параметров.

На поверхности входа в первый контур задавались полные параметры, угол входа потока. Статическое давление подбиралось для получения заданного расхода G_{11} .

На поверхности выхода из первого контура задавались полные параметры, а также угол потока. Для обеспечения расхода G_{s1} варьировалось статическое давление.

Работа вентилятора определялась окружной скоростью вращения ω_B .

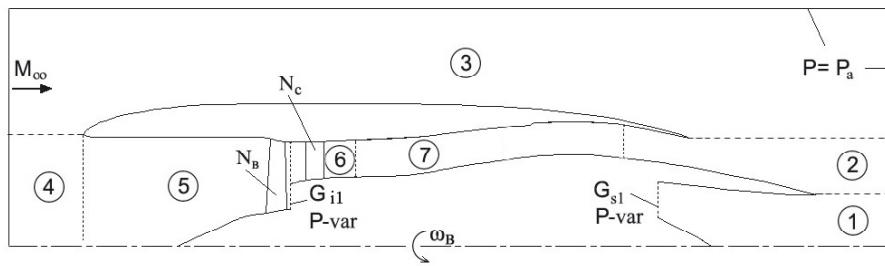


Рис. 1. Блочная структура расчетной области

5. Исходные данные

В качестве примера представлены результаты расчета сопряженного течения газа во втором контуре и в наружной части мотогондолы экспериментальной модели ТРДД.

Режим работы двигателя соответствовал максимальному крейсерскому режиму.

Все величины приводились к безразмерному виду. Эталонном длины был выбран радиус среза сопла наружного контура. В качестве эталонов давления и температуры принимались, соответственно, значения P_a , T_a на свободной границе. Показатель адиабаты $k=1.38$, газовая постоянная $R=287$ Дж/(кг К). Эталонном скорости служила изотермическая скорость звука $\sqrt{RT_a}$. Физическая вязкость, принятая постоянной во всей расчетной области, соответствовала физической вязкости, взятой на свободной границе.

В представленных результатах все расходы газа приводились к расходу газа, определенному на входе в двигатель. Все значения реактивных тяг приводились к идеальной тяге, которая определялась по полным параметрам газа после спрямляющего аппарата и условиям полета.

Фоновая турбулентность течения составила 0.1%. Полетное число Маха – 0.8.

Обороты рабочего колеса вентилятора: 5800 об/мин. Рабочее колесо состояло из 35 лопаток. Число лопаток спрямляющего аппарата – 64.

Расход газа на входе в первый контур: $G_{i1}=0.1882$ кг/с, расход газа из сопла перво-

го контура: $G_{s1}=0.2118$, являются заданными величинами.

6. Результаты расчетов

Используемый метод расчета, основанный на методе установления, позволяет проводить исследования нестационарных газодинамических процессов, которые могут развиваться в расчетной области течения при изменении оборотов вращения колеса вентилятора, изменении геометрии вентилятора и спрямляющего аппарата, изменении конфигурации реактивных сопел, а также при изменении краевых условий на поверхностях входа и выхода в первый контур двигателя.

Представленные ниже результаты расчета получены после установления параметров для некоторого крейсерского режима. Расчет характеризуется поверхностями струй течения, а также полями различных параметров (см.рис.2-10), которые соответствуют данному режиму работы модели двигателя.

Анализируя полученные поля параметров, можно сделать ряд выводов:

В наружной части пристеночной области второго контура возможен отрыв потока;

Отрыв потока возможен также на выходном конусе сопла первого контура;

После прохождения спрямляющего аппарата поток воздуха имеет небольшую отрицательную закрутку, которая может быть устранена аэродинамическими стойками второго контура.

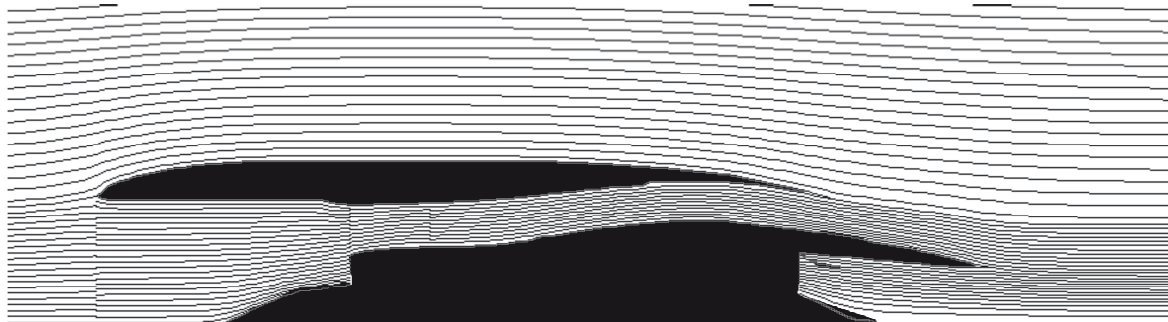


Рис. 2. Семейство лагранжевых поверхностей на установлении течения (поверхности контактного разрыва параметров)

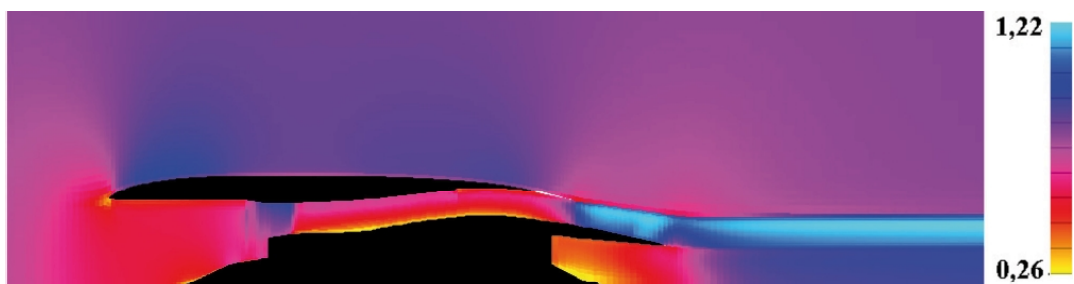


Рис. 3. Число М



Рис. 4. Распределение плотности



Рис. 5. Распределение статической температуры



Рис. 6. Распределение продольной составляющей скорости



Рис. 7. Распределение окружной составляющей скорости



Рис. 8. Распределение полного давления



Рис. 9. Распределение энергии пульсационного движения



Рис. 10. Распределение параметра, характеризующего двухкомпонентность среды

Наряду с визуализацией полей параметров проводились вычисления различных интегральных параметров, среди которых:

- Расчетное значение расхода газа на входе в двигатель, которое отличалось от экспериментального значения прототипа на 0.5%.

- Расчетный расход газа на срезе сопла второго контура 0.8145.

- Идеальная тяга двигателя, которая отличалась от идеальной тяги, полученной расчетным путем на другой математической модели на 0.8%.

- Внутренняя тяга двигателя (определялась по разности импульсов на входе и выходе двигателя) 0.9424.

Все расходы газа приводились к расходу газа, определенному на входе в двигатель. Все значения реактивных тяг приводились к идеальной тяге, которая определялась по полным параметрам газа после спрямляющего аппарата и условиям полета.

В качестве интегрального параметра, характеризующего газодинамическую эффек-

тивность конструкции, рассматривался к.п.д. сопел 1-ого и 2-ого контуров, вычисляемый по соотношению:

$$\eta = \frac{P_{ou}^0(S) - P_{ou}}{P_{in}^0 - P_{ou}}, \quad (2)$$

где: $P_{ou}^0(S)$ – осредненное значение полного давления в выходном сечении;

P_{in}^0 – полное давление в сечении входа;

P_{ou} – статическое давление в сечении выхода.

Расчетные значения к.п.д. составили: для 1-ого контура = 0.97; для 2-ого контура = 0.91.

Заключение

Несомненным преимуществом разработанного метода является его высокая точность и быстрота, которая обеспечивается использованием многопроцессорных расчетных систем.

Разработанный метод, несмотря на кажущуюся упрощенность подхода, а также отсутствие

важных элементов проточной части, каковыми являются аэродинамические стойки, показал хорошие результаты при оценке работоспособности конкретных конструкций двигателей.

В виду того, что число аэродинамических стоек мало по сравнению с числами лопаток вентилятора и спрямляющего аппарата, метод, используемый для моделирования вентилятора и спрямляющего аппарата неприемлем для газодинамического моделирования аэродинамических стоек. Для таких конструкций необходимо использование трехмерных методов.

Принимая во внимание возможную трансформацию одной из стоек в пилон подвески двигателя, сопряженное численное моделирование внутренней и внешней аэродинамики

такой конструкции, является сложной проблемой, и может быть предметом отдельной работы.

Литература

1. Лапотко, В.М. Эйлерово-Лагранжев подход при численном моделировании нестационарных течений идеального газа [текст] / В.М. Лапотко, Ю.П. Кухтин // Авиационно-космическая техника и технология, Харьков: ХАИ, 2007, №7(43), с. 12 - 17.

2. Лапотко В.М. Модель и метод расчета турбулентных течений вязкого теплопроводного газа [текст] / В.М. Лапотко, Ю.П. Кухтин // Авиационно-космическая техника и технология, Харьков: ХАИ, 2003, №41/6, с. 65-68.

Поступила в редакцию 30.05.2014

В.М. Лапотко, Ю.П. Кухтин, Г.І. Слинько. Спряжена газодинамічна модель другого контуру і зовнішньої частини мотогондоли ТРДД

При побудові газодинамічної моделі другого контуру і зовнішньої частини мотогондоли ТРДД використана ейлерово-лагранжева форма опису вісесиметричної закрученої течії середовища. У представленій моделі враховувалася підвид імпульсу та енергії, що відбувається у вентиляторі, а також перетворення енергії у спрямному апараті другого контуру. Течія розглядалася в циліндричній системі координат. В інтегральній формі представлені рівняння, що описують течію середовища. Моделювання явищ тепломасообміну здійснювалося з використанням сучасної моделі турбулентності. При побудові числового алгоритму розрахункова область розділена на декілька підгалузей, що дозволило провести ефективно розпаралелювання обчислювального алгоритму. Широко представлені результати розрахунків локальних і інтегральних параметрів експериментальної моделі двигуна.

Ключові слова: числове моделювання, ейлерово-лагранжеве зображення, мотогондола, сопло, спряжений розрахунок.

V.M. Lapotko, Yu.P. Kukhtin, G.I. Slynko. Conjugated cas-dynamic model of turbofan engine bypass air duct and nacelle exterior

When creating a gas-dynamic model of the turbofan engine bypass duct and nacelle exterior the Euler-Lagrange description form was used for the axi-symmetric swirling medium flow. In the model presented taken into account was the addition of momentum and energy in the fan assembly, as well as the energy conversion in the bypass air duct guide vanes. The flow was considered in the cylindrical coordinates system. The equations describing the medium flow are presented in the integral form. Modeling of heat-and-mass transfer phenomena was carried out by using a modern turbulence model. For developing a numerical algorithm the computational domain was divided into several sub-domains, which permitted to perform an effective parallelizing of the computational algorithm. Amply presented are the computational results for the local and integral parameters of the engine experimental model.

Key words: numerical modeling, Eulerian-Lagrangian representation, engine nacelle, nozzle, conjugated computation.