УДК 621.638

С.Н. Фетисов, М.Ю. Вовк

ОАО «НПО «Сатурн» НТЦ им. А. Люльки, г. Москва, Россия

СПОСОБ УТОЧНЕНИЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

На этапе проектирования газотурбинного двигателя необходимо знание характеристик узлов, входящих в термогазодинамическую математическую модель двигателя. Характеристики узлов уникальных конструкций могут быть определены только оценочно, поэтому необходимо уточнение этих характеристик. На этапе проектирования такое уточнение возможно с использованием методов вычислительной газовой динамики CFD. В данной статье приводится описание этой проблемы и возможный способ ее решения. В качестве примера использования предлагаемой методики рассмотрен расчет тяговых характеристик плоского реактивного сопла с центральным телом на переходном режиме.

Ключевые слова: *ГТД, плоское реактивное сопло, нестационарный процесс, CFD.*

Введение

Термогазодинамический расчет газотурбинного двигателя, как правило, ведется по математическим моделям первого уровня, в которых используются переменные значения физических свойств рабочего тела и задаются коэффициенты, отражающие потери в узлах и элементах двигателя.

Данные характеристики (коэффициенты) получают на основании расчетных и экспериментальных исследований. Для узлов ГТД, получивших широкое применение, например, осесимметричное сверхзвуковое реактивное сопло, имеется большое количество исследований, что позволяет с большой точностью определить характеристики узла на различных режимах работы двигателя.

Разработка передовых двигателей с использованием уникальных конструкций узлов связано, особенно на начальном - эскизном этапе, с дефицитом знаний характеристик нового узла.

Данная статья посвящена описанию способа уточнения характеристик (коэффициентов), входящих в термогазодинамическую математическую модель двигателя.

1. Предлагаемая методика

Уточнение необходимых коэффициентов возможно следующими способами: проведение натурного эксперимента рассматриваемой конструкции узла двигателя, либо проведение расчетов методами CFD.

Каждый из этих способов имеет свои преимущества и недостатки. К преимуществам проведения натурного эксперимента можно отнести высокую достоверность полученных результатов. Недостатками эксперимента являются большая стоимость и время, необходимое на его проведение.

Расчеты методами CFD позволяют в короткие сроки сравнить множество рассматриваемых конструкций узла на заданных режимах работы двигателя, что приводит к сокращению времени на принятие решения о дальнейшей проработке того или иного варианта. В отличие от эксперимента расчет методами CFD не требует таких временных и материальных затрат, но точность результата сильно зависит от квалификации инженера и располагаемых вычислительных ресурсов.

Кроме того, применение методов CFD позволяет получить характеристики узлов по времени, тем самым, повышая точность результатов расчета характеристик двигателя на переходных режимах.

Предлагаемый метод получения более точного термогазодинамического расчета, путем уточнения коэффициентов, характеризующих потери в рассматриваемых узлах, состоит из следующих этапов:

1. Термогазодинамический расчет двигателя по математической модели первого уровня. Значение коэффициентов задается приблизительным. Для решения нестационарных задач значения коэффициентов принимаются постоянными;

2. Подготовка расчетной модели рассматриваемого узла для решения задачи методами CFD;

3. Решение задачи методами CFD;

4. Термогазодинамический расчет двигателя по

© С.Н. Фетисов, М.Ю. Вовк, 2012

математической модели первого уровня, при этом значения коэффициентов для рассматриваемого узла берутся из результатов расчета методами CFD;

Данный способ подходит как для решения стационарных, так и нестационарных задач.

2. Пример использования способа

В качестве примера использования предложенной методики рассмотрен расчет тяговых характеристик плоского реактивного сопла с центральным телом на переходном режиме.

Одним из способов снижения ИК заметности летательного аппарата является применение плоского реактивного сопла с центральным телом.

По причине недостаточного количества исследований, посвященных плоским соплам с центральным телом, характеристики таких сопел могут быть определены только оценочно [1], но для проектирования двигателя необходимо их уточнение.

Схема плоского реактивного сопла представлена на рис. 1. Сопло состоит из дозвуковой створки (1), сверхзвуковой створки (2) и центрального тела, состоящего из дозвуковой створки (3), центральной створки (4) и сверхзвуковой створки (5). На схеме не показана механизация сопла, приводящая в движение его элементы.

При эксплуатации двигателя на штатном режиме створки центрального тела находятся в убранном положении (рис. 1, а). При переходе на режим малой заметности в результате работы механизации сопла створки образуют центральное тело (рис. 1, б).

В качестве переходного режима рассмотрен процесс формирования центрального тела. Время процесса формирования центрального тела принято $t_ф = 1$ с. Общее время рассматриваемого процесса принято $t_п = 4$ с. Начало перекладки створок начинается в момент времени $t = 1$ с.

Данный переходный процесс связан с изменением величины площади критического сечения сопла по времени, которая является регулирующим фактором программы управления двигателем. В связи с этим задание граничных условий для решения задачи методами CFD обязано отражать изменение параметров рабочего тела в двигателе, вызванное следованию заданной программе регулирования.

В математическую модель расчета характеристик сопла входят два коэффициента [2]:

1. Коэффициент скорости истечения газа из сопла - φ, характеризующий эффективность преобразования энергии давления в кинетическую энергию газов, покидающих сопло;

2. Коэффициент расхода - μ, характеризующий пропускную способность сопла.

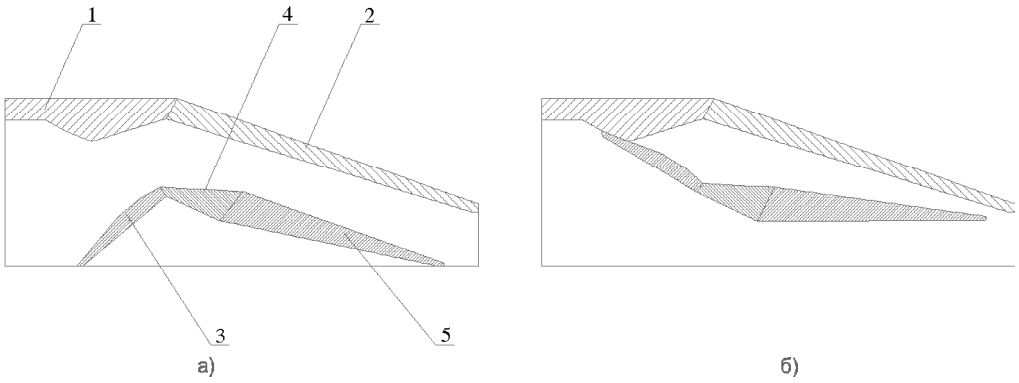


Рис. 1. Схема плоского реактивного сопла: а) режим малой заметности; б) крейсерский режим

Уточнение μ в рассматриваемом примере не проводилось.

В программах термогазодинамического расчета переходных процессов двигателя φ задается оценочно для выбранного типа канала. С помощью использования методов CFD возможно получение изменения величины этого коэффициента по времени переходного процесса, что позволяет более точно определить тяговые характеристики на переходных режимах.

Решение поставленной задачи проводилось при помощи программного комплекса ANSYS CFX, а так же программы термогазодинамического расчета с возможностью расчета переходных процессов.

Решение поставленной задачи проводилось в следующей последовательности:

1. а) Получение зависимости величины площади критического сечения сопла от времени из кинематического расчета створок центрального тела. Изменение величины относительной площади критического сечения сопла отображено на рис. 2;

б) Термогазодинамический расчет параметров рабочего тела в характерных сечениях двигателя на переходном режиме. Значение коэффициента скорости истечения газа из сопла

принято постоянным. Изменение площади критического сечения сопла по времени заложено в математическую модель программы управления двигателем. Изменение относительных параметров рабочего тела перед соплом по времени показаны на рис. 3.



Рис. 2. Изменение относительной площади критического сечения сопла по времени

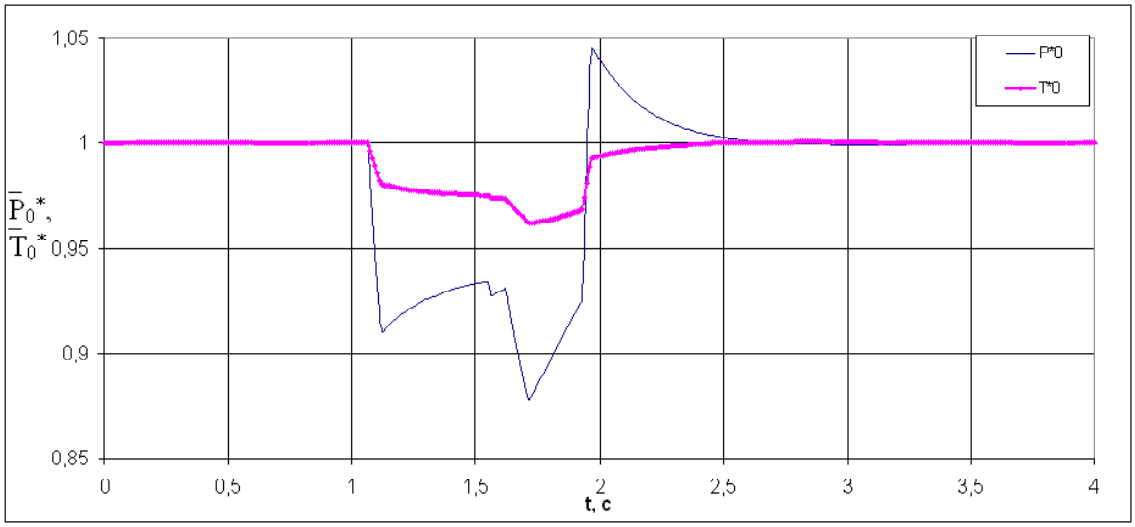


Рис. 3. Изменение относительных параметров рабочего тела на входе в сопло по времени

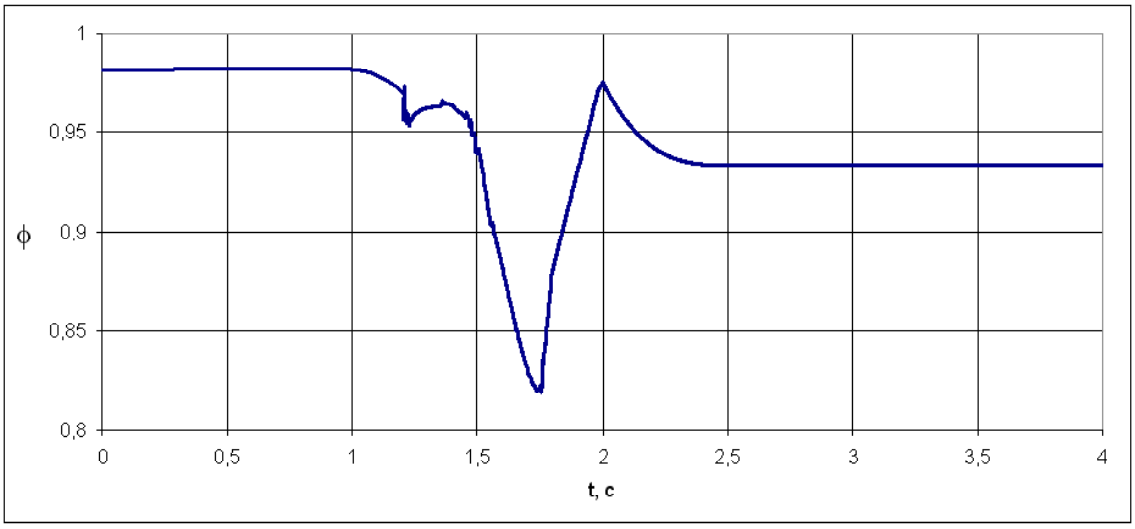


Рис. 4. Изменение ϕ по времени

2. Подготовка расчетной модели для решения задачи методами CFD. В качестве граничных условий заданы параметры рабочего тела, полученные в п. 1. б;

3. Решение задачи методами CFD, в результате которого получено изменение φ по времени, представленное на рис. 4;

4. Термогазодинамический расчет параметров двигателя. С целью учета изменения φ по времени, в математическую модель была заложена зависимость φ от перепада давления на сопле - π_c. Аппроксимация этой зависимости представлена на рис. 5.

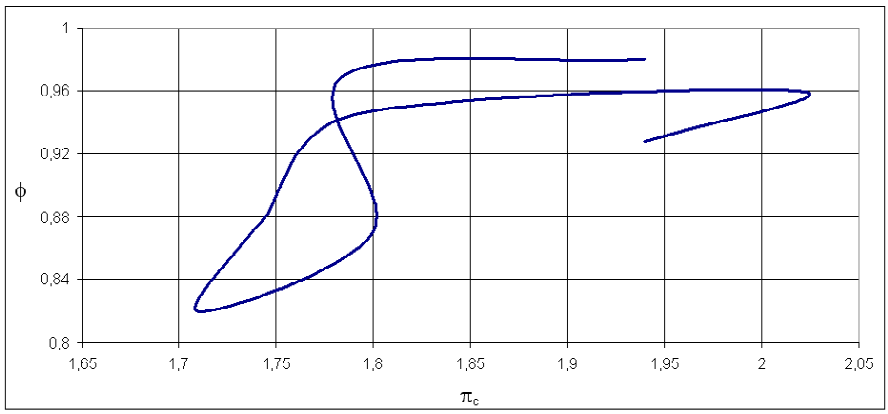


Рис. 5. Изменение φ по π_c

3. Выводы

В результате термогазодинамического расчета предложенным способом были получены тяговые характеристики сопла на переходном режиме. На рис. 6 представлено изменение относительной тяги при постоянном и полученном при расчете методами CFD величины φ по времени.

Как видно из полученных графиков, во время переходного процесса наблюдается сильный провал по тяге, при чем, в случае использования φ, изменяющегося по времени, провал по тяге составляет порядка 55%.

Такой характер изменения тяги по времени обусловлен двумя причинами:

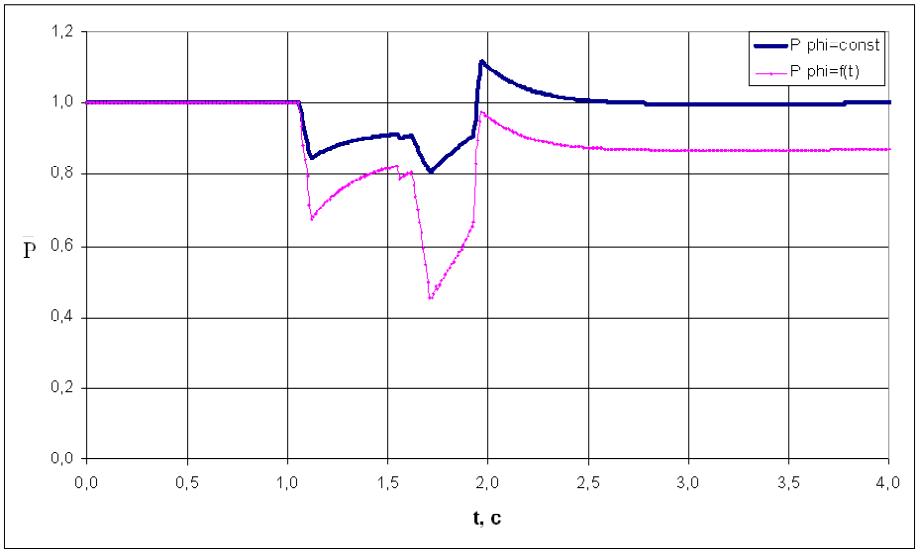


Рис. 6. Изменение относительной тяги по времени

1. При увеличении величины площади критического сечения сопла происходит уменьшение величины полного давления на входе в сопло, что приводит к уменьшению π_c, вследствие чего уменьшается скорость истечения из сопла и, соответственно, величина тяги;

2. Изменение ϕ по времени, полученное расчетом методами CFD, указывает на недостаточное геометрическое воздействие поверхностей элементов сопла на газовый поток во время перекладки створок, что снижает эффективность преобразования энергии давления потока в кинетическую.

По результатам расчета получен характер изменения φ от π_c, который можно использовать для расчета аналогичных переходных режимов

других конструкций плоских сопел с центральным телом, не прибегая к дополнительным расчетам или проведению экспериментов.

В целом, полученные данные позволяют продолжить дальнейшую разработку в нужном направлении конструкции и кинематики сопла, а так же лучше понять процессы, происходящие на переходном режиме.

4. Заключение

В заключении стоит отметить, что расчеты методами CFD, позволяют на этапе проектирования ГТД получать характеристики узлов двигателя, не прибегая к проведению эксперимента, что позволяет сократить средства и время, необходимые на разработку двигателя.

Кроме того, расчет переходных процессов методами CFD позволяет отыскать слабые места конструкции рассматриваемых узлов, что играет немаловажную роль в разработке двигателя.

Литература

1. Лаврухин Г.Н. Аэрогазодинамика реактивных сопел [Текст] Внутренние характеристики сопел. / Г.Н. Лаврухин // М.: Наука. ФИЗМАТЛИТ, 2003. - Т. 1. - 376 с.

2. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок [Текст]: учебник / В.И. Бакулев, В.А. Голубев, Б.А. Крылов и др.; под редакцией В.А. Сосунова, В.М. Чепкина - М.: Изд-во МАИ, 2003.- 688 с.

Поступила в редакцию 01.06.2012

С.Н. Фетисов, М.Ю. Вовк. Спосіб уточнення термогазодинамічної математичної моделі проектованих газотурбінних двигунів за допомогою методів обчислювальної газової динаміки

На етапі проектування газотурбінного двигуна необхідне знання характеристик вузлів, що входять в термогазодинамічну математичну модель двигуна. Характеристики вузлів унікальних конструкцій можуть бути визначені тільки оціночно, тому необхідно уточнення цих характеристик. На етапі проектування таке уточнення можливе з використанням методів обчислювальної газової динаміки CFD. У даній статті наводиться опис цієї проблеми і можливий спосіб її вирішення. Як приклад використання запропонованої методики розглянуто розруханок тягових характеристик плоского реактивного сопла з центральним тілом на перехідному режимі.

Ключові слова: *ГТД, плоске реактивне сопло, нестаціонарний процес, CFD.*

S.N. Fetisov, M.Y. Vovk. A method of precise mathematical model of thermogas dynamics of developing jet engines with using computational fluid dynamics

At stage of developing jet engine, coefficients within thermogas dynamics mathematical model of jet engine must be present. Knowledge of parameters of unique components is insufficient, therefore precise of coefficients is needed. Precise is possible with using a computational fluid dynamics. This article contains an overview of this problem and possible method for solving. Also, for example of using proposed method, computation of propulsion performance characteristics of flat jet nozzle with central body is present.

Key words: *jet engine, jet nozzle, unsteady state, CFD.*