

УДК 519.626

**ПРЯМЫЕ МЕТОДЫ ПРОФИЛИРОВАНИЯ  
ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ФОРМ**

© 2011 г.

*А.А. Крайко*

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва

Alya\_Kraiko@ciam.ru

*Поступила в редакцию 15.06.2011*

Разработан прямой метод оптимизации широкого класса пространственных аэродинамических форм, основанный на аппроксимации искомой геометрии поверхностями Безье–Бернштейна. Тестирование метода на задаче профилирования оптимальной сверхзвуковой части осесимметричного сопла Лаваля максимальной тяги показало его высокую эффективность. Предложенный метод применяется к задачам профилирования пространственных переходных каналов, пространственного сопла прямооточного воздушно-реактивного двигателя, а также профилирования сверхзвуковой части пространственного сопла в плотной многосопловой компоновке. Для описания более полного многообразия форм предлагается модификация способа описания искомой геометрии – неоднородная поверхность Безье–Бернштейна. Полученные результаты демонстрируют возможности применения предложенного метода к различным задачам оптимизации пространственных конфигураций.

*Ключевые слова:* поверхность Безье–Бернштейна, прямые методы оптимизации, переходные каналы, пространственное сопло.

Речь пойдет о прямом методе профилирования широкого класса оптимальных пространственных форм, основанном на «удачной» аппроксимации искомой геометрии. В настоящей работе этот метод применяется к задаче профилирования пространственных переходных каналов, например, между узлами турбореактивного двигателя (ТРД), к задаче профилирования пространственного сопла высокоскоростного прямооточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД), а также к задаче профилирования сверхзвуковой части пространственного сопла в плотной многосопловой компоновке (ПМК).

Как было показано ранее [1], удачной аппроксимацией в случае осесимметричной сверхзвуковой части сопла Лаваля максимальной тяги оказалась аппроксимация формы образующей кривыми Безье–Бернштейна (КББ). Задача оптимизации осесимметричной сверхзвуковой части сопла Лаваля заданной длины была выбрана в качестве тестовой, так как для нее существует точное решение, полученное методом контрольного контура [2, 3]. Сравнение результатов оптимизации, полученных предложенным прямым методом, с точным решением подтвердило высокую эффективность первого. При малом числе варьируемых параметров, что соответствует невысокому порядку аппроксимирующей КББ, предложенный метод позволял получать сопла, близкие к оптимальным с точностью не менее 0.03% по идеальной

тяге (отношение тяги сопла к тяге сопла, построенного на равномерный выход) в широком диапазоне длин.

При переходе к пространственной оптимизации подобная аппроксимация также показала свою эффективность. Разумеется, пространственные конфигурации должны аппроксимироваться уже не кривыми, а поверхностями Безье–Бернштейна (ПББ). Для расчета удельной тяги выполнялось численное интегрирование уравнений Эйлера методом установления, использовалась «распадная» расчетная схема [4–6], обеспечивающая второй порядок аппроксимации по пространству на гладких решениях и второй порядок по времени. В качестве метода оптимизации в настоящем исследовании применялся метод исчерпывающего градиентного спуска.

Первой исследуется компоновка из  $N$  идентичных пространственных сопел, ограниченных цилиндрической поверхностью (рис. 1а). В такой постановке цилиндрическая поверхность описывает, например, внутренний габарит пусковой установки (шахты). Каждое из  $N$  сопел располагается в ограничивающем секторе цилиндра с углом  $2\pi/N$ . Начиная с некоторой степени расширения, оптимальная форма сопла в таких условиях перестает быть осесимметричной. Такую компоновку сопел будем называть плотной. При оптимизации заданными считаются следующие параметры: радиус шахты,

число сопел, суммарная тяга или расход через сопла, максимальная длина сверхзвуковой части сопел, полные параметры в критическом сечении и перепад давлений, а целевой функцией является значение удельной тяги (отношение тяги к расходу). Для решения поставленной задачи достаточно рассмотреть одно из сопел компоновки, которое, в свою очередь, имеет плоскость симметрии, поэтому в итоге задача решается для одной из «половинок» сверхзвуковой части сопла. Математическая постановка задачи сводится к определению координат контрольных точек ПББ и построенной на ее основе форме сверхзвуковой части сопла (с учетом всех наложенных ограничений), имеющей максимальную удельную тягу. Поверхность образующей сверхзвуковой части сопла, удовлетворяющая всем наложенным габаритным ограничениям, (исключая ограничение на максимальную длину), получается как результат усечения аппроксимирующей ПББ ограничивающей ее поверхностью (рис. 1б).

Полученные в ходе оптимизации сопла сравниваются с оптимальными осесимметричными

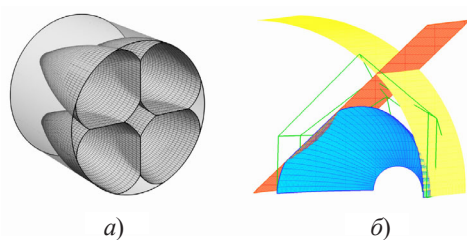


Рис. 1

соплами, удовлетворяющими тем же ограничениям (то есть с оптимальными осесимметричными соплами заданной длины, каждое из которых вписано в ограничивающий сектор цилиндра). Также полученные сопла сравниваются с осесимметричными соплами, усеченными ограничивающим сектором, степень расширения которых больше чем у строго осесимметричных сопел. Помимо этого рассматриваются сопла, форма сверхзвуковой части которых допускает появление дополнительных изломов, отличных от линий пересечения ограничивающей поверхности с поверхностью сопла. Кроме сопел с круглым критическим сечением, рассматриваются сверхзвуковые части сопел с некруглым входом, таким образом, форма критического сечения становится еще одним управлением при оптимизации. Проведено сравнение с результатами, полученными В.М. Борисовым и И.Е. Михайловым в [7].

В ряде случаев ПББ с фиксированным числом контрольных точек не может эффективно

описать все многообразие форм, необходимое для данного конкретного случая. Так, в задачах профилирования переходных каналов в ТРД может потребоваться обеспечить переход от круглого сечения к прямоугольному на заданной длине при минимальных потерях полного давления, кроме того, входное и выходное сечения, как правило, должны располагаться на разных уровнях (например, из соображений заметности в случае переходного канала от форсажной камеры к плоскому соплу). В случае ВРД с ковшовым воздухозаборником канал должен обеспечить переход от односвязного сечения к двусвязному (кольцевому). Сопло ПВРД также может иметь довольно сложную пространственную форму из-за некруглой формы поперечного сечения камеры сгорания, которая может быть к тому же сдвинута от оси летательного аппарата (ЛА), и других габаритных ограничений, продиктованных особенностями компоновки ЛА.

В результате предлагается модификация способа описания поверхности – неоднородная поверхность Безье – Бернштейна (НПББ): у такой поверхности может быть задан произвольный набор контрольных кривых, которые, в отличие от обычных ПББ, являются не КББ, а любыми заданными параметрическими кривыми, параметры которых могут варьироваться в ходе оптимизации. В частности, для расширения области применения программного комплекса и удобства его использования, реализована поддержка описания оптимизируемых объектов в виде внешних модулей (плагинов). Полученные результаты демонстрируют возможность применения предложенного метода к решению самых разных задач оптимизации пространственных конфигураций. Соавторами работы являются А.Н. Крайко и К.С. Пьянков (ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва).

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 08-01-00178) и АВЦП РНП ВШ 2.1.1/200.*

#### Список литературы

1. Крайко А.А., Пьянков К.С. Эффективные прямые методы в задачах построения оптимальных аэродинамических форм // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2010. Т. 50, №9. С. 1624–1631.
2. Шмыглевский Ю.Д. Аналитические исследования динамики газа и жидкости. М.: Эдиториал УРСС, 1999.
3. Крайко А.Н. Вариационные задачи газовой динамики. М.: Наука, 1979. 447 с.
4. Годунов С.К. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
5. Колган В.П. Использование принципа мини-

мальных значений производной к построению конечно-разностных схем для расчета разрывных решений газовой динамики // Уч. зап. ЦАГИ. 1972. Т. 3, №6. С. 681.

6. Тилляева Н.И. Обобщение модифицированной схемы С.К. Годунова на произвольные нерегу-

лярные сетки // Уч. зап. ЦАГИ. 1986. Т. 17, №2. С. 18–26.

7. Борисов В.М., Михайлов И.Е. Об оптимизации сверхзвуковых частей пространственных сопел // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1981. Т. 21, №2. С. 517–519.

## DIRECT METHODS FOR OPTIMAL 3-DIMENSIONAL AERODYNAMIC FORMS DESIGN

*A.A. Kraiko*

The direct method for a wide range of 3D aerodynamic forms optimal design based on the approximation of required geometry with the help of Bezier – Bernstein surfaces is developed. Its high efficiency was shown during solving the problem of optimal axisymmetric Laval nozzle supersonic part of maximum thrust design. Suggested method is applied to 3D transition channels design, to ramjet 3D nozzle design and to the supersonic part of 3D nozzle from compact multiple-jet configuration design. For more detailed description of shapes variety the required geometry description technique modification – non-uniform Bezier – Bernstein surface is offered. Obtained results demonstrate the ability of the suggested method to be applied to different 3D configurations design problems solving.

*Keywords:* Bezier – Bernstein surface, direct optimization methods, transition channels, 3D nozzle.