

УДК 629.7.036

С. Д. Ваулин, доктор технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), Челябинск

М. А. Карташева, кандидат технических наук, Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), Челябинск

А. Л. Карташев, доктор технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), Челябинск

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СОПЕЛ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С МНОГОКОМПОНЕНТНЫМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ

Рассмотрена задача профилирования оптимальных (обеспечивающих максимальное значение тяги) конфигураций кольцевых сопел внешнего расширения с многокомпонентным рабочим телом. Для решения поставленной задачи применяются прямые методы вариационного исчисления. Вариационная задача поиска оптимальной конфигурации сводится к задаче нелинейного программирования. В результате оптимизации построены оптимальные конфигурации кольцевых сопел для различных рабочих тел и условий работы.

Ключевые слова: оптимальное кольцевое сопло, вариационная задача.

Рассматривается задача профилирования оптимальной (обеспечивающей максимальное значение тяги) конфигурации кольцевого сопла с многокомпонентным рабочим телом [1]. Поиск оптимальной конфигурации кольцевого сопла проводится путем решения вариационной задачи [2], которое осуществляется с помощью прямых методов вариационного исчисления [1, 3, 4].

Рассматриваемая вариационная задача, при постановке которой в число оптимизируемых параметров включаются геометрические характеристики сопла (при этом параметры конденсированной фазы и показатель изоэнтропы k , а также располагаемый перепад давлений в сопле p_0/p_n считаются постоянными), сводится к задаче нелинейного программирования [3]. Основными элементами данного подхода являются прямые расчеты поля течения и метод поиска экстремума функций многих переменных, что делает его применимым ко всем газодинамическим задачам, для которых известны методы расчета поля течения, в том числе и для кольцевых сопел с многокомпонентными потоками.

Данный подход применяется для поиска оптимальных кольцевых сопел различных конфигураций с многокомпонентным рабочим телом, профилируемых в условиях различных габаритных ограничений. Основное внимание уделено задаче построения оптимальной конфигурации кольцевого сопла внешнего расширения (без внешней обечайки) с укороченным центральным телом, представленного на рис. 1.

В качестве основного критерия оптимальности используется коэффициент тяги

$$K_T = \frac{R}{F_* P_0}, \quad (1)$$

где R – тяга сопла; F_* – площадь минимального сечения сопла; P_0 – давление торможения на входе в сопло.

Прямые расчеты поля течения проведены для многокомпонентной среды с моно- и полидисперсной конденсированной фазой.

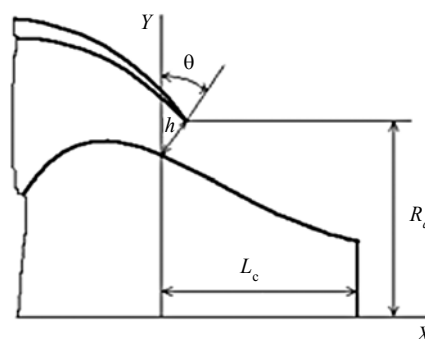


Рис. 1. Конфигурация кольцевого сопла для проведения оптимизации

Для математического моделирования двухфазного монодисперсного течения в кольцевом сопле использована система уравнений осесимметричного течения двухфазной смеси в интегральной форме [1, 5, 6], позволяющая вести сквозной счет без предварительного выделения разрывов в расчетной области. Расчет поля течения осуществляется методом установления с помощью вычислительного алгоритма, построенного с использованием схемы С. К. Годунова – В. П. Колгана [1, 4, 7, 8]. Для описания обменных членов в двухфазной монодисперсной среде использовались соотношения, предложенные в работе [5].

Для математического моделирования течений многокомпонентной среды в кольцевых соплах использовались уравнения непрерывной модели, записанные для дискретной функции распределения (основные положения использованного дискретного подхода для сопел Лавала представлены в [4, 5, 9]).

Для поиска экстремума целевой функции использован метод Розенброка (варианты метода с дискретным шагом и с минимизацией по направлению), позволяющий осуществлять многомерный поиск без использования производных и обладающий достаточной скоростью сходимости [1].

В поставленной вариационной задаче в процессе оптимизации учитываются два основных фактора, действующих в многокомпонентной среде: влияние

движения конденсированной фазы на газодинамическую структуру потока и осаждение частиц на обтекаемые поверхности. Изменение геометрии профилированных поверхностей вследствие осаждения (прилипания) частиц конденсированной фазы на эти поверхности не учитывалось.

Оптимизация геометрической конфигурации кольцевого сопла с учетом дотранзвуковой области течения проводилась для исходной конфигурации кольцевого сопла со следующими параметрами (обезразмеренными на величину R_a):

- относительный радиус верхней точки минимального сечения $\bar{R}_a = 1$;
- относительная площадь минимального сечения $\bar{F}_a = 0,65$;
- показатель изэнтропы газа $k = 1,25$;
- длина сопла $L_c = R_a$;
- перепад давлений в сопле $p_o/p_n = 100$.

На оптимизируемый профиль накладывались габаритные ограничения по длине L_c и радиусу R_a . Ограничения на ординату конечной точки профиля центрального тела не накладывались, так как ее положение в большинстве рассматриваемых случаев не выходит за пределы заданной габаритной зоны сопла.

На рис. 2 представлены результаты оптимизации геометрии кольцевого сопла с учетом и без учета дотранзвуковой области течения.

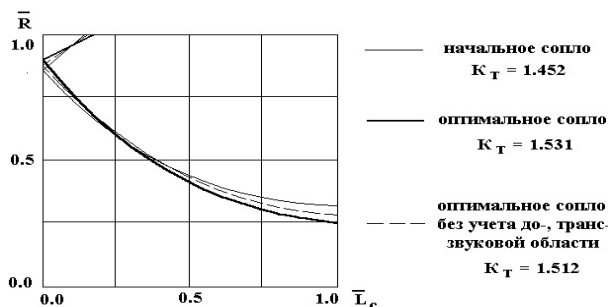


Рис. 2. Конфигурации кольцевых сопел, полученные при различных условиях профилирования

Полученный оптимальный профиль центрального тела лежит несколько ниже, чем профиль сопла, полученный при проведении прямых расчетов поля течения от плоской звуковой поверхности, угол наклона плоскости кольцевого минимального сечения увеличился. Значение K_T сопла, полученного с учетом дотранзвуковой области течения, оказалось выше K_T , полученного без учета этой области течения на $\approx 1,2\%$ ($K_T = 1,531$ против $K_T = 1,512$), что составляет довольно значительное изменение тяговых характеристик. Интересной особенностью полученного результата является то, что неравномерность потока в минимальном сечении сопла приводит к увеличению его тяговых характеристик.

Прямые расчеты поля течения в ходе проведения дальнейшей оптимизации проводились с учетом

дотранзвуковой области течения. Геометрия начального приближения сопла для двухфазной монодисперсной среды выбрана близкой к геометрии оптимального кольцевого сопла для расчета чистого газа, полученной выше.

На рис. 3 приведены результаты оптимизации кольцевого сопла с двухфазным рабочим телом, содержащим твердые частицы размером $d = 5$ мкм.

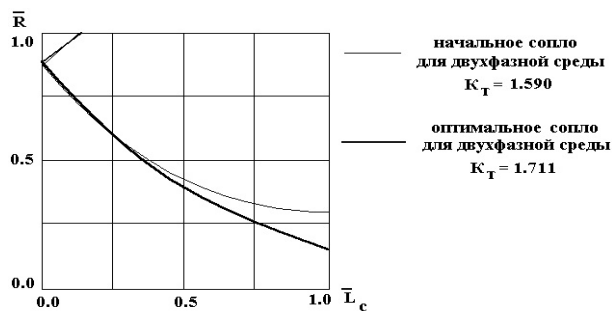


Рис. 3. Начальное и оптимальное сопла с двухфазным рабочим телом

Массовая доля конденсированной фазы в двухфазной смеси составляла $z = 0,4$. Процедура оптимизации включала учет величины импульса осаждения на центральное тело кольцевого сопла. При этом считалось, что осевшие на центральное тело частицы полностью передают ему свой импульс. В результате оптимизации получено увеличение тяговых характеристик сопла на $\approx 7,2\%$ (с $K_T = 1,590$ до $K_T = 1,705$).

Характерной особенностью полученного оптимального профиля являются практически неизменные параметры (ширина и угол наклона) кольцевого минимального сечения, что связано со слабым влиянием наличия конденсированной фазы на параметры кольцевого минимального сечения. Напротив, координаты профиля центрального тела имеют существенные отличия, особенно в конечной части профиля, что объясняется формой траекторий движения частиц конденсированной фазы, начинающей интенсивно осажаться именно в этой части кольцевого сопла. Применение установленного оптимизационного критерия – максимального значения коэффициента тяги – приводит к геометрии сопла, в которой потери тяги из-за осаждения частиц минимальны.

На рис. 4 представлены геометрия исходного профиля кольцевого сопла и результаты его оптимизации для чистого газа и для многокомпонентной полидисперсной среды с массовой долей конденсированной фазы $z = 0,3$.

В этом случае параметры начального профиля центрального тела были одинаковы для обеих рассмотренных вариационных задач. Результаты численного моделирования показали значительное влияние конденсированной фазы на оптимизируемый профиль центрального тела сопла, при этом оптимальные для чистого газа и многокомпонентной среды кольцевые сопла значительно отличаются профилем концевой части центрального тела.

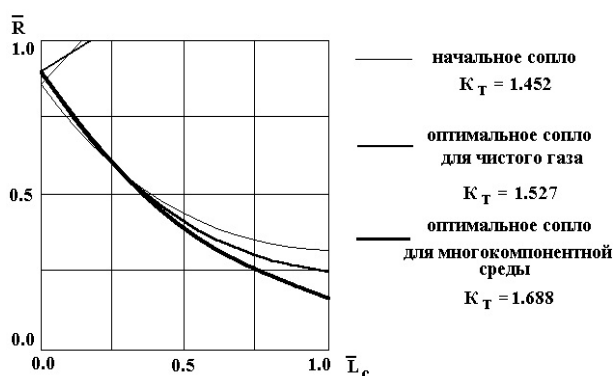


Рис. 4. Сравнение оптимальных сопел для различных рабочих тел (чистого газа и многокомпонентной среды)

Интересно отметить, что при укорочении центрального тела до безразмерной длины $L_c \approx 0,25R_a$ получим практически одинаковые оптимальные профили центрального тела для чистого газа и многокомпонентной смеси, что объясняется отсутствием выпадения частиц на поверхность центрального тела до координаты $L_c \approx 0,25R_a$ по оси абсцисс. Установленная особенность является специфической особенностью кольцевого сопла внешнего расширения и позволяет применять кольцевые сопла с укороченным центральным телом малой длины ($L_c < 0,25R_a R_a$) при использовании в качестве рабочего тела как газа, так и многокомпонентной среды. Многокомпонентный поток в таком сопле расширяется вокруг конечной кромки внешней обечайки, заканчивающейся в плоскости кольцевого минимального сечения, при этом радиальная компонента вектора скорости частиц конденсированной фазы, направленная в сторону оси сопла, значительно уменьшается, так как частица увлекается достаточно плотным газовым потоком в сторону, противоположную оси сопла. В дальнейшем расширение газового потока в сторону оси сопла при обтекании профилированного центрального тела вызывает движение частиц к оси сопла (скорость частиц в радиальном направлении невелика, так как они увлекаются потоком газа, имеющим низкую плотность) и, как следствие этого, осаждение частиц на поверхность центрального тела.

В результате решения поставленных вариационных задач и проведенной с помощью прямого метода оптимизации геометрии кольцевых сопел построены оптимальные конфигурации кольцевых сопел с двухфазным монодисперсным и многокомпонентным полидисперсным рабочими телами при заданных геометрических параметрах кольцевого сопла и параметрах рабочего тела. Проведено сравнение оптимальных по тяге кольцевых сопел с двухфазным и многокомпонентным рабочими телами с оптимальным кольцевым соплом для чистого газа.

Результаты математического моделирования получены с применением высокопроизводительных вычислений на суперкомпьютере «Торнадо ЮУрГУ» ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ) с производительностью до 473,6 TFlops.

Библиографические ссылки

1. *Карташев А. Л., Карташева М. А.* Математическое моделирование течений в кольцевых соплах : монография. – Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2011. – 158 с.
2. *Крайко А. Н.* Вариационные задачи газовой динамики. – М. : Наука, 1979. – 447 с.
3. *Бутов В. Г., Васенин И. М., Шелуха А. И.* Применение методов нелинейного программирования для решения вариационных задач газовой динамики // ПММ. – 1977. – Т. 41. – Вып. 1. – С. 59–64.
4. Газовая динамика двухфазных течений в соплах / И. М. Васенин, В. А. Архипов, В. Г. Бутов [и др.]. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 1986. – 262 с.
5. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами / Л. Е. Стернин, Б. Н. Маслов, А. А. Шрайбер [и др.]. – М. : Машиностроение, 1980. – 176 с.
6. *Карташев А. Л., Карташева М. А.* Математическое моделирование гидрогазодинамических процессов при движении двухфазной среды в кольцевых соплах. – Вестник ЮУрГУ. Сер. «Математическое моделирование и программирование». – 2013. – Т. 6. – № 1. – С. 25–33.
7. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов [и др.]. – М. : Наука, 1976. – 400 с.
8. *Колган В. П.* Применение принципа минимальных значений производной к построению конечноразностных схем для расчета разрывных решений газовой динамики // Ученые записки ЦАГИ. – 1972. – Т. 3. – № 6. – С. 68–77.
9. *Карташев А. Л., Карташева М. А.* Математическое моделирование течений многокомпонентных сред в кольцевых соплах // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Машиностроение». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 37–46.

S. D. Vaulin, DSc in Engineering, Professor, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk
M. A. Kartasheva, PhD in Engineering, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk
A. L. Kartashev, DSc in Engineering, Professor, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk

Designing of Optimal Annular Nozzles of Flying Machines with Multicomponent Working Medium

The problem of profiling optimal (i.e. securing maximum value of thrust) configurations of annular nozzles of external expansion with a polyphase (or multicomponent) working medium is considered. Direct methods of a calculus of variations are applied to the solution of a problem in view. The variational problem of search of an optimal configuration of annular nozzle is reduced to a problem of nonlinear programming. Optimal configurations of annular nozzles for different working mediums and operating conditions were built as a result of optimization.

Keywords: optimal annular nozzle, variational problem.

Получено 14.07.2014