

УДК 532.525.2:621.5

В. А. Николаев, кандидат технических наук, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

С. Н. Храмов, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДАВЛЕНИЯ ЗАПУСКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВЫХЛОПНЫХ ДИФFUЗОРОВ

Аппроксимацией расчетных и экспериментальных данных получены аналитические модели давления запуска цилиндрических выхлопных диффузоров оптимальной длины для чисел Маха в начальном сечении струи 1...5; углов полураствора сопла 0...30 °; отношений удельных теплотемостей 1,1...1,67.

Ключевые слова: выхлопной диффузор, оптимальная длина, давление запуска.

При наземной отработке высотных ракетных двигателей в составе комплекса испытательного оборудования широко используются выхлопные диффузоры [1]. Наиболее сложным является выбор геометрических параметров диффузора, обеспечивающего заданное высотное давление при минимальном влиянии на измеряемые при испытаниях составляющие вектора тяги ракетного двигателя. Сложность процессов в диффузорах предполагает в основном экспериментальные методы их исследования, обобщение результатов которых позволяет получить аналитические модели эксплуатационных характеристик диффузоров. По своему характеру эти модели являются аппроксимационными, лишь приближенно описывающими влияние различных факторов, связанных с обрабатываемым ракетным двигателем (параметры рабочего тела и соплового блока) и характерными размерами диффузора. Кроме того, они справедливы только для определенных диапазонов определяющих параметров.

Однако даже такие модели позволяют на этапе проектирования стендового комплекса проследить и оценить количественно влияние различных факторов, как на элементы стендового оборудования, прежде всего на системы замера составляющих силы тяги ракетного двигателя, так и на сам обрабатываемый ракетный двигатель. Для сокращения времени на подготовку стендового оборудования к отработке конкретного варианта ракетного двигателя используются аналитические модели, учитывающие как конструктивные особенности сопел ракетных двигателей, так и свойства рабочих тел.

К настоящему времени наиболее известны одномерные модели, описывающие осесимметричные течения в соплах и в диффузорах [2]. К сожалению, они не учитывают конструктивные параметры сопла (в частности, угол раствора на срезе) и особенности течения в диффузоре, обусловленные ударно-волновой структурой струи. Масштабирование пусковых и предельных характеристик диффузоров значениями, полученными из теоретических моделей, позволяет получить достаточно простые аналитические модели, учитывающие, например, число Маха

и угол раствора сопла, показатель адиабаты рабочего тела и диаметр цилиндрического диффузора.

Обычно такие эксперименты проводятся в ограниченных диапазонах изменения определяющих параметров, что обусловлено как энергетическими, так и материальными возможностями экспериментальной базы. Поэтому одной из задач, решаемых при разработке аналитических моделей, является расширение диапазонов изменения определяющих факторов. Это необходимо для перенесения результатов модельных исследований на натурные условия, в том числе на реальные рабочие тела. При этом результаты проведенных экспериментальных исследований используются как для формирования аналитических моделей, так и для их тестирования по опорным точкам планов факторных экспериментов. Проверка экстраполяционных свойств полученных моделей проводится по результатам отработки ракетных двигателей в стендовых имитаторах высотных условий.

Одним из масштабов, определяющих характеристики диффузоров, является линия максимальных диаметров начального участка сверхзвуковой струи [3], пересечение которой с образующей диффузора определяет его минимальную длину (рис. 1). Длина диффузора, достаточная для существования в нем течения типа псевдоскачка, является оптимальной из условия минимумов донного давления и давления запуска. Минимальная и оптимальная длины охватывают весь диапазон длин цилиндрических диффузоров, используемых в практике отработки ракетных двигателей.

Идеализированная диаграмма $p_d(p_0)$ показывает пути аппроксимации пусковых и предельных характеристик диффузоров. При давлениях перед соплом, соответствующих дозвуковым перепадам, торможение струи в расширяющейся части сопла делает незначительными ее эжектирующие свойства. Поэтому можно принять (и это не противоречит экспериментальным данным), что до точки 1, для которой $p_d/p_n = \pi_{кр}$, донное давление практически не меняется.

При длине диффузора, равной минимальной, автотемпературный режим (запуск) будет по достижении параметров в точке 2. В момент запуска внутренняя

(по параметрам донной области) нерасчетность струи (отношение давления на срезе сопла к давлению в донной области) скачкообразно изменяется за счет резкого понижения донного давления от $p_{*д}$

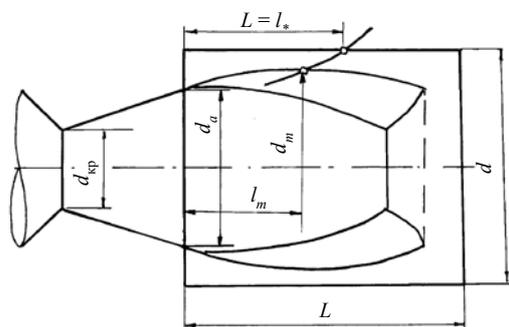


Рис. 1. Масштабы диффузоров при отработке ракетных двигателей

При увеличении длины диффузора автомодельный режим начинается при меньших давлениях перед соплом, но при его наступлении (например, в точке 5) все равно сохраняется режим предельной нерасчетности. При оптимальной длине диффузора наступление автомодельного режима происходит при наименьшем давлении перед соплом (точка 6). Однако и при этом не исключаются скачкообразные перестройки течения в диффузоре по линиям 4–6, 7–8. Полностью безударный запуск при оптимальной длине диффузора происходит по линии 1–8–6.

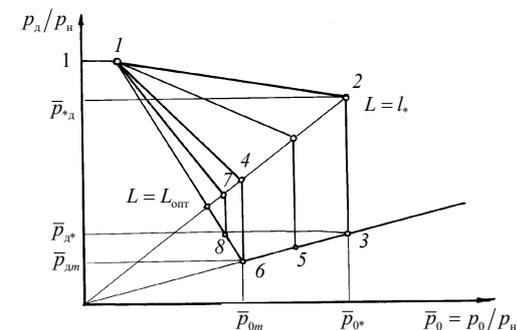
Для практических целей важным является то, что точки перехода от режима эжектирования (от точки 1 до точек 2, 4, 7) к предельным режимам (точки 6, 5, 3) можно считать расположенными на прямых, проходящих через начало координат. Это соответствует гипотезе о постоянстве внутренней нерасчетности струи p_a/p_d в момент запуска диффузора.

Тогда координаты точек 1, 2, 3 и 6 полностью определяют характеристики диффузоров в диапазоне длин от минимальной l^* до оптимальной $L_{\text{опт}}$.

В соответствии с физической картиной течения сверхзвуковой струи в канале достаточной длины торможение потока происходит в системе скачков уплотнения, эффективность которых примерно соответствует эффективности прямого скачка. Оптимальной длиной диффузора будет такая, при которой достигается наименьшее донное давление p_{dm} при наименьшем давлении перед соплом p_{0m} .

Аналитическая модель максимального диаметра начального участка сверхзвуковой струи [3] позволяет определить минимальную длину канала $L = l^*$ (рис. 1), являющуюся масштабом, определяющим давление запуска диффузора. Так как при фиксированных параметрах сопла (α , M_a) и рабочего тела ($k = c_p/c_v$) максимальный диаметр струи зависит только от нерасчетности, то методом итераций решается уравнение $\bar{d}_m - \bar{d} = 0$, из которого определяется нерасчетность $n = p_a/p_d$, при которой максимальный диаметр струи касается стенки диффузора. По найденному значению n определяется минимальная длина диффузора l^* . Как показали эксперименталь-

ные исследования, проведенные на воздухе, при используемых на практике диаметрах диффузора, незначительно (на 5...20 %) отличающихся от диаметра среза сопла, оптимальная длина диффузора примерно в четыре раза больше минимальной длины. Влияние числа Маха (расширения сопла) при этом учтено масштабом (минимальная длина l^*).



ные исследования, проведенные на воздухе, при используемых на практике диаметрах диффузора, незначительно (на 5...20 %) отличающихся от диаметра среза сопла, оптимальная длина диффузора примерно в четыре раза больше минимальной длины. Влияние числа Маха (расширения сопла) при этом учтено масштабом (минимальная длина l^*).

В [1] показано, что в одномерной постановке масштабировать давление запуска цилиндрического диффузора достаточной длины, при которой возможен режим псевдоскачка, можно по формуле прямого скачка уплотнения

$$\frac{p_{0m}}{p_h} = \frac{F}{F_{\text{кр}}} \cdot y\left(\frac{1}{\lambda}\right),$$

где F и $F_{\text{кр}}$ – площади сечения диффузора и критического сечения сопла, а $y(1/\lambda)$ – газодинамическая функция, рассчитанная из условия расширения потока от критического сечения до стенки диффузора.

Однако поток на входе в диффузор отличается от равномерного, что обусловлено характером течения в области от критического сечения до цилиндрической части диффузора. Поэтому даже для идеального диффузора давление запуска отличается от рассчитанного по одномерной модели [4]. Отличия обусловлены изменением энтропии в процессах, сопровождающих перестройку течения от критического сечения сопла до конца псевдоскачка в выходном сечении диффузора. Теоретически можно рассчитать отношение энтропий только для прямого скачка уплотнения в предположении адиабатичности течения и малой толщины прямого скачка. Достаточная длина псевдоскачка существенно влияет на масштабировующую функцию. Кроме того, значимым фактором оказывается сверхзвуковая часть сопла, формирующая поток на участке эжектирования – от среза сопла до контакта со стенкой диффузора. Предельными значениями этого фактора следует считать:

– непрерывный профиль идеального диффузора от критического сечения до цилиндрической части диффузора;

– отсутствие сверхзвуковой части сопла – свободное расширение потока от критического сечения до входа в диффузор.

Для диффузора со сверхзвуковым соплом дополнительными факторами будут следующие:

– отношение диаметра диффузора к диаметру среза сопла;

– отношение диаметра среза сопла к диаметру критического сечения;

– угол наклона касательной к профилю сопла на срезе (угол полураствора для конического сопла).

Расчетные схемы течений в диффузоре и полученные аппроксимацией расчетных и экспериментальных данных аналитические модели давления запуска цилиндрических диффузоров оптимальной длины представлены в табл. 1.

Таблица 1. Модели течения в цилиндрическом диффузоре оптимальной длины

Расчетная схема течения	Математическая модель
<p>Прямой скачок уплотнения</p>	$\frac{p_0 \cdot F_{кр}}{p_H \cdot F} = y\left(\frac{1}{\lambda}\right);$ $\lambda = M \cdot \sqrt{\frac{k+1}{2}} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2}\right)^{-1};$ $y(\lambda) = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \frac{\lambda}{1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2}$
<p>Псевдоскачок в идеальном диффузоре</p>	$\frac{p_0 \cdot F_{кр}}{p_H \cdot F} = f(k, M);$ $f(k, M) = a_0 + a_1 \cdot M + a_2 \cdot M^2;$ $a_0 = 1,639 - 4,767 \cdot 10^{-2} \cdot k + 1,904 \cdot 10^{-1} \cdot k^2;$ $a_1 = -(8,242 - 5,887 \cdot k + 1,963 \cdot k^2) \cdot 10^{-1};$ $a_2 = (4,972 - 3,110 \cdot k + 1,069 \cdot k^2) \cdot 10^{-2}$
<p>Диффузор со звуковым соплом</p>	$\frac{p_0 \cdot F_{кр}}{p_H \cdot F} = f_1\left(k, \frac{d_{кр}}{d}\right);$ $f_1\left(k, \frac{d_{кр}}{d}\right) = b_0 + b_1 \cdot \frac{d_{кр}}{d} + b_2 \cdot \left(\frac{d_{кр}}{d}\right)^2;$ $b_0 = -0,618 + 1,248 \cdot k - 0,224 \cdot k^2;$ $b_1 = 3,001 - 3,454 \cdot k + 0,934 \cdot k^2;$ $b_2 = -1,851 + 3,041 \cdot k - 0,910 \cdot k^2$
<p>Диффузор со сверхзвуковым соплом</p>	$\frac{p_0 \cdot F_{кр}}{p_H \cdot F} = f_1\left(k, \frac{d_{кр}}{d}\right) \cdot f_2\left(M_a, \alpha^0, \frac{d}{d_a}\right);$ $f_2\left(M_a, \alpha^0, \frac{d}{d_a}\right) = 1,182 + 0,066 \cdot M_a + 0,030 \cdot \alpha^0 -$ $-0,027 \cdot \frac{d}{d_a} - 0,0513 \cdot M_a \cdot \frac{d}{d_a} - 0,020 \cdot \alpha^0 \cdot \frac{d}{d_a}$

Сравнение результатов расчетов по рассмотренным моделям для $k = 1,4$ (воздух) приведено на рис. 2.

Интересно отметить, что давление запуска диффузора со звуковым соплом оказывается меньше, чем в случае сверхзвукового конического сопла. Это говорит о том, что свободное расширение потока в струе энергетически менее затратно по сравнению с явно не оптимальным коническим соплом.

Полученные аналитические модели позволяют качественно оценить влияние конструктивных параметров сопла и диффузора на давление запуска.

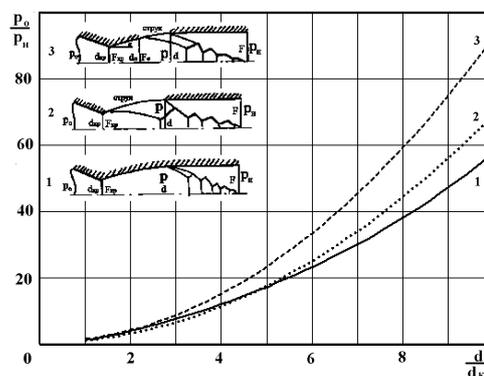


Рис. 2. Давление запуска цилиндрических диффузоров оптимальной длины

Библиографические ссылки

1. Шишков А. А. Высотные испытания реактивных двигателей. – М. : Машиностроение, 1985. – 208 с.

2. Крокко Л. Одномерное рассмотрение газовой динамики установившихся течений // Основы газовой динамики. – М. : Иностр. лит., 1963. – С. 63–324.

3. Храмов С. Н. Аналитическая модель максимального диаметра начального участка сверхзвуковой струи // Вестник ИжГТУ. – 2010. – № 3(47). – С. 44–48.

4. Храмов С. Н. О масштабах псевдоскачка при торможении струи в канале // Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей : межвуз. науч. сб. – Уфа, 1987. – № 11. – С. 45–49.

V. A. Nikolaev, PhD in Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

S. N. Khramov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Analytical Models of the Launch Characteristics of Cylindrical Diffusers

Approximation of calculated and experimental data allowed obtaining the analytical models of the launch characteristics of cylindrical exhaust diffusers for Mach numbers in the home section 1–5, nozzle divergence angle $0 - 30^\circ$ and for the relations of specific heats 1.1 – 1.67.

Key words: cylindrical exhaust diffuser, optimal length, launch pressure.

УДК 62-85:539.319

Л. Т. Раевская, кандидат физико-математических наук, доцент, Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБРАЦИЙ ДЕТАЛЕЙ ПНЕВМОДВИГАТЕЛЯ

Проведен расчет резонансных частот поршня пневмодвигателя и исследовано поведение системы вблизи первой резонансной частоты.

Ключевые слова: частота вынужденных колебаний, аксиально-поршневой пневмодвигатель, резонанс.

Преимущества аксиально-поршневых пневмодвигателей типа ДАР: малые габариты на единицу мощности, пригодность для работы в тяжелых эксплуатационных условиях (повышенные температуры, пыль, влажность, вибрация), высокая безопасность работы позволяют использовать их в качестве приводов. Конструкция пневмодвигателей была разработана под руководством М. С. Кауфмана [1] (одна из возможных кинематических схем приведена на рис. 1, а, взятом из статьи Ивашова И. В. [2]). В этой конструкции (рис. 1, а) предусмотрены двухсторонние поршни 1, ротор 2 с двухсторонней криволинейной поверхностью 3, состоящей из трех волн синусоиды, монолитные блоки 4 цилиндров, которые выполнены в виде цельных гильз с прорезью в средней части для прохода торцового кулачка. Схематическое изображение поршня с профильной дорожкой ротора показано на рис. 1, б. Анализ кинематических схем, а также опыт освоения пневмодвигателей ДАР показывают, что схемы многократного действия более перспективны и имеют по сравнению с радиально-поршневыми двигателями ряд преимуществ [2].

1. Преобразующий механизм позволяет за счет редуцирования и применения двухсторонних поршней получить на выходном валу повышенный крутящий момент.

2. Взаимно параллельное расположение осей поршней и выходного вала позволяет снизить вес и габариты в 1,5–2 раза по сравнению с радиально-

поршневыми двигателями и повысить на 10–15 % экономичность (за счет сокращения длины воздухоподводящих каналов) [2].

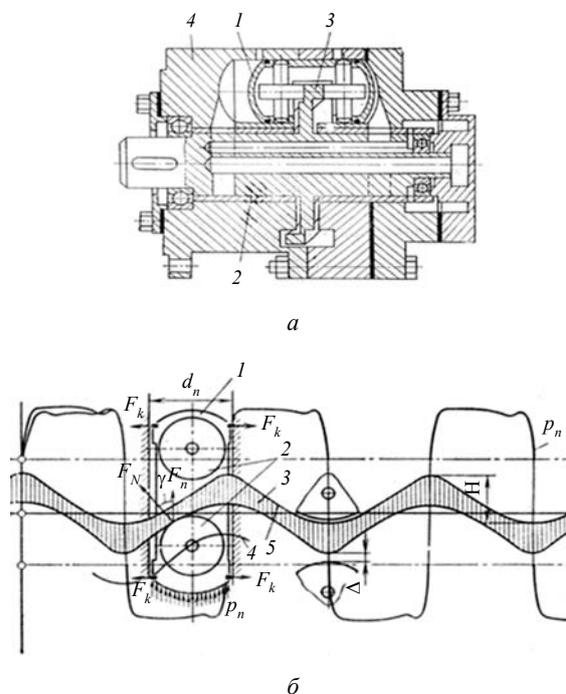


Рис. 1. Двигатель аксиально-поршневой, реверсивный (а); схематическое изображение поршня с профильной дорожкой ротора (б)