



Рис. 5. Коническое колесо с неэвольвентным профилем зубьев

Получено 15.11.2016

**Библиографические ссылки**

1. Пат. № 6853 / Б. А. Лопатин, С. А. Хаустов. – 2006.
2. Лопатин Б. А., Цуканов О. Н., Полуэктов Е. А. Угловая регулировка электромеханических приводов в авиационно-космической промышленности // Вестник Машиностроения. – 2009. – № 2. – С. 14–16.
3. Пат. № 6853.
4. Лопатин Б. А., Цуканов О. Н. Эвольвентно-конические колеса : монография / ЮУрГУ. – Челябинск, 2005.
5. Св. о гос. регистрации пакета компьютерного программного обеспечения № 2009614819 / Б. А. Лопатин, С. А. Хаустов, Е. А. Полуэктов. – 2009.
6. Там же.

УДК 532.525.2:621.5

С. Н. Храмов, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ДОННОГО ДАВЛЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВЫХЛОПНОМ ДИФFUЗОРЕ**

Цилиндрические выхлопные диффузоры используются для имитации высотного давления при стендовых испытаниях ракетных двигателей [1]. Одной из задач, решаемых при подготовке стендового оборудования, является выбор конструктивных параметров диффузора, обеспечивающих заданные эксплуатационные характеристики выхлопного диффузора. Технической характеристикой выхлопного диффузора является разрежение, соответствующее расчетной высоте, характерной для испытываемого ракетного двигателя.

Обзоры методов расчета донного давления, например [2], показывают, что практически все они основаны на схеме Г. Корста [3] с разделительной линией тока. Положение этой линии определяется как профилем скорости в окружающем струю пограничном слое, так и условиями натекания струи на стенку диффузора. Сложные газодинамические процессы, сопровождающие распространение сверхзвуковой струи в диффузоре, предполагают либо экспериментальные методы определения донного давления, либо использование «тяжелых» программных пакетов типа ANSYS или Flow Vision [4]. К сожалению, оба подхода достаточно трудоемки, требуется значительное время для получения практических результатов.

Существенно ускорить получение исходных данных, необходимых для начала проектирования выхлопного диффузора для испытаний конкретного

ракетного двигателя, можно при использовании аналитических моделей, реализованных на простых программах типа Mathcad. Базовой для них является модель максимального диаметра начального участка недорасширенной сверхзвуковой струи [5]. Многочисленные эксперименты на различных рабочих телах показали, что линия максимальных диаметров начального участка сверхзвуковой недорасширенной струи может использоваться в качестве масштаба, определяющего характеристики диффузора [6]. Анализ моделей, определяющих течение в выхлопных диффузорах, приведен в [7].

Типичным приложением аналитической модели такого уровня является расчет донного давления при истечении сверхзвуковой недорасширенной струи в цилиндрический диффузор (рис. 1).

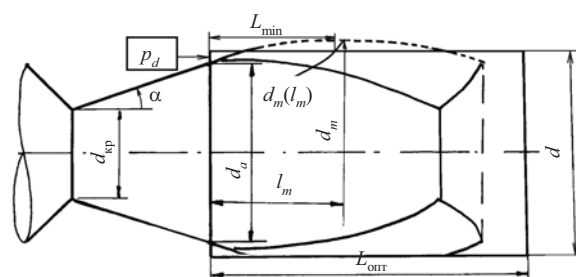


Рис. 1. Начальный участок струи в цилиндрическом диффузоре

Как показано в [8], течение в донной области на границе струи до встречи со стенкой канала аналогично течению в пограничном слое свободной струи. Этот факт можно положить в основу простейшей модели донного давления. Для этого нужно найти соответствующий той же нерасчетности максимальный диаметр начального участка струи, который, конечно, будет больше диаметра диффузора. Разница размеров зависит от профиля скорости в пограничном слое струи. Сравнение с экспериментом показало, что хорошие результаты дает зависимость, аналогичная по структуре формуле Г. Шлихтинга [9, с. 660], полученной для профиля скорости свободного пограничного слоя в зоне перемешивания (см. обозначения на рис. 1):

$$\frac{d_m}{d_a} = \left\{ \left[ 1 - \left( 1 - \frac{d_a}{d} \right)^{3/2} \right]^{-2} \right\} \frac{d}{d_a}.$$

Внутренняя нерасчетность струи, определяемая отношением давления на срезе сопла  $p_a$  к донному давлению  $p_d$ , определится как решение нелинейного уравнения

$$d_m(n = p_a/p_d, M_a, \alpha, k) - d = 0,$$

в котором максимальный диаметр струи  $d_m$  рассчитывается по изложенной в [10] аналитической модели. Такой алгоритм позволяет учесть влияние на внутреннюю нерасчетность основных факторов: число Маха и угол полураствора сопла, показатель адиабаты рабочего тела, диаметр цилиндрического диффузора.

Влияние на внутреннюю нерасчетность и, соответственно, на донное давление длины диффузора и давления перед соплом, демонстрирует описанный в [11] рис. 2.

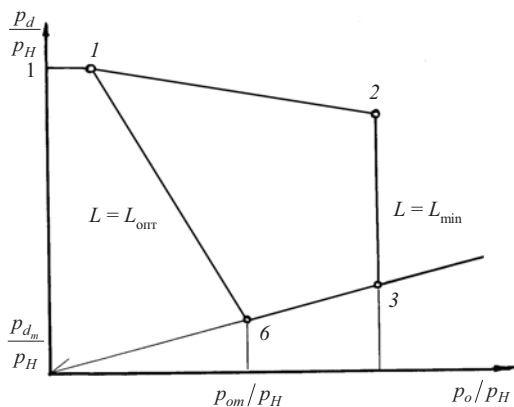


Рис. 2. Донное давление в цилиндрическом диффузоре

Значимыми для формирования аналитической модели, позволяющей рассчитать донное давление в диффузоре, являются точки 6 — минимальное донное давление, реализуемое в диффузоре оптимальной длины и 3 — донное давление в диффузоре минимальной длины, при которой еще возможен автотельный режим предельной нерасчетности.

Пример реализации аналитической модели показан на рис. 3. Результаты получены с использованием демоверсии *MathCAD*.

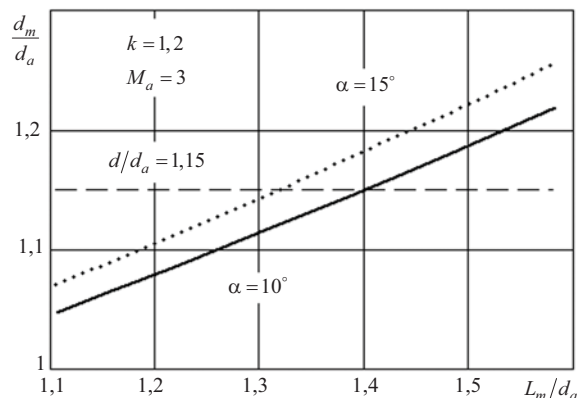


Рис. 3. К определению минимальной длины диффузора

По заданным размерам сопла и показателю адиабаты рабочего тела рассчитывается число Маха на срезе сопла. На рис. 3 показаны графики для двух углов полураствора сопла. Диапазон нерасчетностей подбирается пробными расчетами. Горизонтальная линия — диаметр диффузора.

По экспериментальным данным, масштабирование длины диффузора минимальной длиной описывается зависимостью

$$L_{\text{опт}}/L_{\text{мин}} = 11,29 - 0,446\alpha - 4,825(d/d_a) + 0,276\alpha(d/d_a).$$

При этом влияние числа Маха (расширение сопла) полностью учтено масштабированием — минимальной длиной диффузора. Для диффузора оптимальной длины рабочее давление на автотельном режиме будет минимальным. При большем давлении перед соплом донное давление будет пропорционально давлению перед соплом, так как при этом не меняется внутренняя нерасчетность истечения.

#### Библиографические ссылки

1. Шишков А. А., Силин Б. М. Высотные испытания реактивных двигателей. — М.: Машиностроение, 1985. — 208 с.
2. Засухин О. Н., Булат П. В., Продан Н. В. Развитие методов расчета донного давления // *Фундаментальные исследования*. — 2012. — № 6. — С. 273–279.
3. Корст Г. Теория определения донного давления в околозвуковом и сверхзвуковом потоках // *Механика*. — 1957. — № 5. — С. 49–63.
4. Латин И. Н. Постановка вычислительного эксперимента газодинамической задачи для исследования воздушной модели выхлопного диффузора // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. — 2012. — № 33. — С. 98–108.
5. Храмов С. Н. Аналитическая модель максимального диаметра начального участка сверхзвуковой струи // *Вестник ИжГТУ*. — 2010. — № 3(47). — С. 44–48.
6. Храмов С. Н. О масштабных псевдоскачках при торможении струи в канале // *Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей: межвуз. науч. сб.* — Уфа, 1987. — № 11. — С. 45–49.

7. Николаев В. А., Храмов С. Н. Аналитические модели давления запуска цилиндрических выхлопных диффузоров // Вестник ИжГТУ. – 2013. – № 2(58). – С. 13–16.

8. Баланин Б. А. Истечение сверхзвуковой струи в каналы различной формы // Инженерно-физический журнал (ИФЖ). – 1968. – Т. XV, № 1. – С. 91–97.

Получено 21.11.2016

9. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 712 с.

10. Храмов С. Н. Аналитическая модель максимального диаметра начального участка сверхзвуковой струи.

11. Николаев В. А., Храмов С. Н. Указ. соч.

УДК 621.914

Т. Р. Хазиев, филиал Южно-Уральского государственного университета (Национального исследовательского университета), Златоуст

Б. А. Лопатин, доктор технических наук, профессор, филиал Южно-Уральского государственного университета (Национального исследовательского университета), Златоуст

Е. А. Полуэктов, кандидат технических наук, филиал Южно-Уральского государственного университета (Национального исследовательского университета), Златоуст

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ РАБОТЫ ПРИВОДОВ ВРЕЗАНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАШИНЫ БЕЗОГНЕВОЙ РЕЗКИ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

При ремонте трубопроводов для вырезки дефектных участков применяются специальные машины, где в качестве режущего инструмента используется дисковая фреза [1]. В России широкое распространение получила машина «Волжанка-3М», выпускаемая ЦБПО АО «Транснефть-Приволга» (рис. 1). Машина устанавливается на трубе и закрепляется с помощью цепей (на рис. 1 не показано), охватывающих трубу. Надежное закрепление машины осуществляется с помощью натяжных устройств, включающих в себя амортизаторы 1, рычаги 2 с натяжной звездочкой 3. Машина работает следующим образом. Вращение от вала электродвигателя 4 через ременную передачу передается на ведущий вал редуктора 5. На выходном валу 6 этого редуктора установлена фреза 7. Врезание режущего инструмента производится винтовым механизмом врезания 8 путем поворота редуктора на цапфах, установленных в корпусе тележки 9.

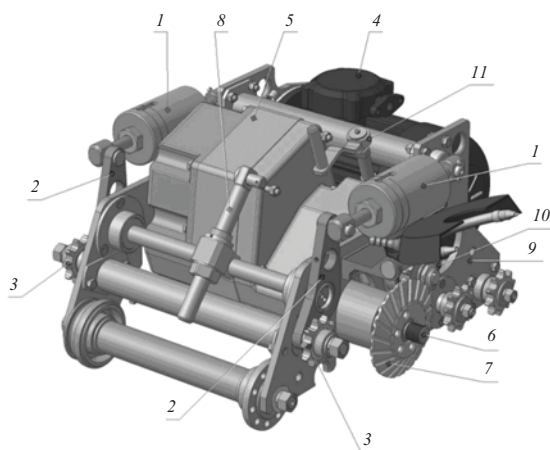


Рис. 1. Машина безогневой резки труб «Волжанка-3М»

Перемещение тележки 9 по трубе производится приводом подачи, который приводится в движение от выходного вала редуктора 5 привода вращения инструмента. Вращение от этого вала передается на приводную звездочку 10. Звездочка 10, находясь в зацеплении с неподвижной цепью, охватывающей разрезаемую трубу, приводит в движение тележку 9 и вместе с ней режущий инструмент 7. Включение подачи (перемещение машины по трубе) осуществляется механизмом включения 11. Рез осуществляется за счет перемещения машины по поверхности трубы. Данная машина была разработана сотрудниками кафедры технической механики филиала ЮУрГУ (НИУ) в г. Златоусте по заказу ЦБПО АО «Транснефть-Приволга» [2].

Несмотря на широкое применение этой машины, ее эксплуатация выявила ряд недостатков:

- жесткая кинематическая связь привода перемещения и привода вращения инструмента не позволяет регулировать скорость перемещения по трубе при резке труб разного диаметра и толщины, что часто приводит к преждевременному износу инструмента, недопустимому увеличению силы резания, вызывающей поломку инструмента или элементов привода;

- ручная врезка инструмента (фрезы) является небезопасной, так как оператор осуществляет работу вблизи зоны резания; особенно опасной является первая врезка инструмента, поскольку в трубопроводе могут присутствовать горючие остатки нефтепродуктов.

Для устранения указанных недостатков была предложена конструкция машины [3], оснащенная независимыми управляемыми приводами перемещения машины по трубе и врезания инструмента на основе вентильных электродвигателей. Такая конст-