

УДК 62-543

Исследование тяговых и расходных характеристик сопловых блоков с регулируемым минимальным сечением

Быков Н.И.¹, Десятниченко И.А.²

^{1,2} Студенты, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Научный руководитель: Д.А. Ягодников, д.т.н., профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия

МГТУ им. Н.Э. Баумана
ollikahnstex@rambler.ru
ivan1234590@gmail.com

На практике представляет интерес разработка и внедрение способа управления тягой ракетного двигателя на твёрдом топливе (РДТТ) при помощи перекрытия прямоугольного минимального сечения сопла заслонкой. При перекрытии минимального сечения сопла изменяется тяга РДТТ и создаётся управляющее усилие за счёт перераспределения статического давления по внутренней поверхности сопла.

Целью работы является разработка методики численного расчёта движения потока продуктов сгорания твёрдого ракетного топлива (ТРП) по соплу РДТТ, распределения параметров потока по длине сопла, а также оценка влияния степени закрытия минимального сечения заслонкой на структуру потока, осевую и боковую составляющие тяги, а также на коэффициенты расхода и тяги сопла.

Экспериментальные исследования сопловых блоков с регулируемым минимальным сечением [5], [7] не позволяют подробно исследовать сложную пространственную структуру потока, обтекающего заслонку. Поэтому задача решалась численными методами универсальной программной системы конечно-элементного (МКЭ) анализа ANSYS 12.1 [6]–[8].

В работе выполнено математическое моделирование соплового блока при постоянном давлении в камере сгорания (КС), что позволило отработать алгоритмы построения расчётных сеток, численного решения и определения тяговых и расходных

характеристик. Затем исследование проводилось с учётом зависимости скорости горения ТРТ от давления в зоне горения согласно формуле Бори

$$p_{\text{к}}^* = \left(\frac{\rho_{\text{т}} \cdot U_1 \cdot F_{\text{г}} \cdot \sqrt{\chi \cdot R \cdot T_{\text{к}}^*}}{F_{\text{кр}} \cdot \Phi_{\text{с}} \cdot A(k)} \right)^{\frac{1}{1-\nu}} = A \cdot \left(\frac{1}{F_{\text{кр}}} \right)^{\frac{1}{1-\nu}},$$

$$A = p_{\text{к.0}}^* \cdot (F_{\text{кр.0}})^{\frac{1}{1-\nu}} \approx 3,441 \cdot 10 \text{ Па}^{14} \text{ м} \cdot \text{с}^5,$$

где $p_{\text{к}}^*$ – полное давление (давление торможения) в КС; $F_{\text{кр}}$ – площадь минимального сечения сопла; $\nu = 0,8$ – показатель степени в законе горения модельного ТРТ; A – постоянная величина для заданного топлива, не зависящая от изменения площади минимального сечения; $p_{\text{к.0}}^* = 6,38 \cdot 10^6 \text{ Па}$ – полное давление в КС при полностью открытом минимальном сечении сопла; $F_{\text{кр.0}} = 8,83834 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ – площадь полностью открытого минимального сечения. Результатом стали реальные поля характеристик модельного соплового блока РДТТ.

Модельный сопловой блок, изображённый на рисунке 1, представляет собой коническое сопло с углом раскрытия конуса 22° . Минимальное сечение имеет форму прямоугольника. Регулирование производится заслонкой, перекрывающей минимально сечение по линейному закону с одной стороны. Ось X декартовой системы координат направлена вдоль оси конуса сопла. Ось Y – по направлению движения заслонки. На чертеже пунктиром показано, как будет выглядеть модельный сопловой блок в момент полного выгорания сопла.

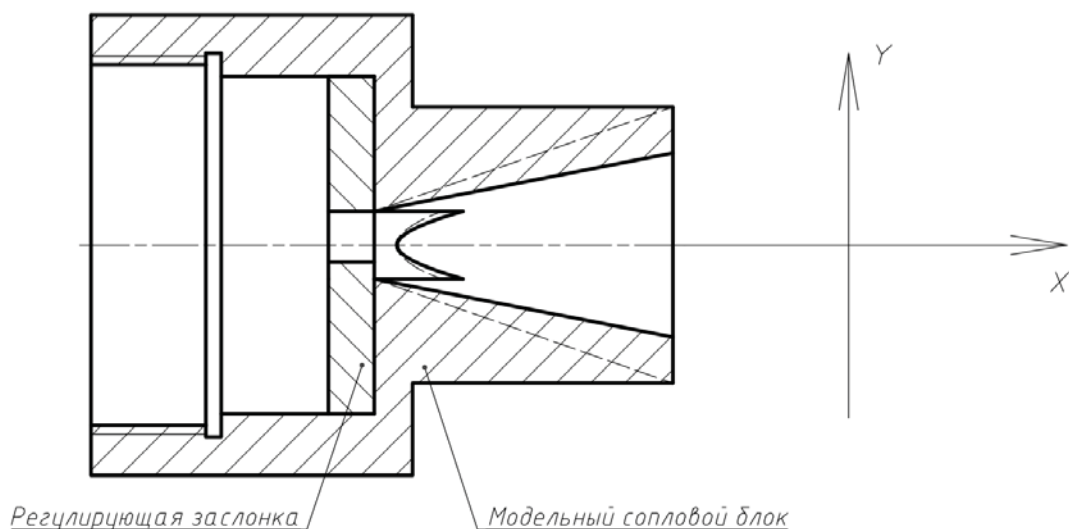


Рис. 1. Модельный сопловой блок: степень закрытия минимального сечения – 25 %

При построении модели был принят ряд допущений.

1. Течение газа – адиабатическое.
2. Критическое и минимальное сечения сопла совпадают.
3. Течение продуктов сгорания (ПС) по соплу принимается равновесным и стационарным при каждой рассматриваемой степени закрытия минимального сечения сопла.
4. В продуктах сгорания отсутствует к-фаза.
5. Течение трёхмерное, симметричное относительно плоскости ХУ.
6. Отсутствует влияние унесённой массы при разгаре на поток ПС.

Для численного расчёта были построены геометрические модели расчётных областей (областей течения газа по соплу) для различных степеней закрытия минимального сечения сопла. Модели полностью открытого сопла и сопла со степенью перекрытия минимального сечения 40 % представлены на рисунке 2 (без выгорания). Для степеней закрытия 0, 25 и 40 % были построены модели с различной степенью выгорания сопла: 0, 25, 50, 75 и 100 процентов.

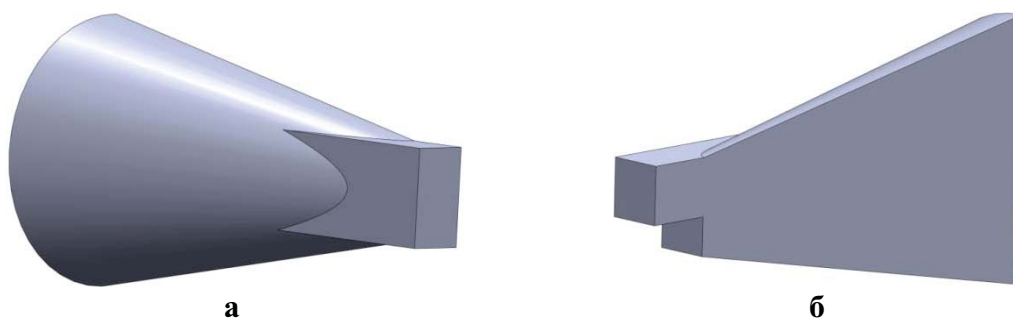


Рис. 2. Модель расчётной области полностью открытого сопла (а) и сопла со степенью перекрытия минимального сечения – 40 % (б)

В такой модели сверхзвуковой поток, обтекая заднюю кромку заслонки минимального сечения, поворачивается на некоторый угол. Реализуется течение Прандтля-Майера, происходит изэнтропический поворот потока в системе скачков уплотнения, газ расширяется и ускоряется. Образуется две области: область свободного сверхзвукового потока и донная область. В двумерном потоке около критической точки присоединения (скорость потока $U_{\text{РЛТ}} = 0$), куда попадает разделяющая линия тока (РЛТ), происходит разделение потока: часть его движется вниз по течению вдоль обтекаемой поверхности сопла, а другая поступает в циркуляционную зону, образуя возвратное течение. В трёхмерном потоке область присоединения находится в окрестности критической линии присоединения, по которой пересекаются

разделяющая поверхность тока (РПТ) и стенка сопла. Возникающая система скачков уплотнения схематично показана на рисунке 3.

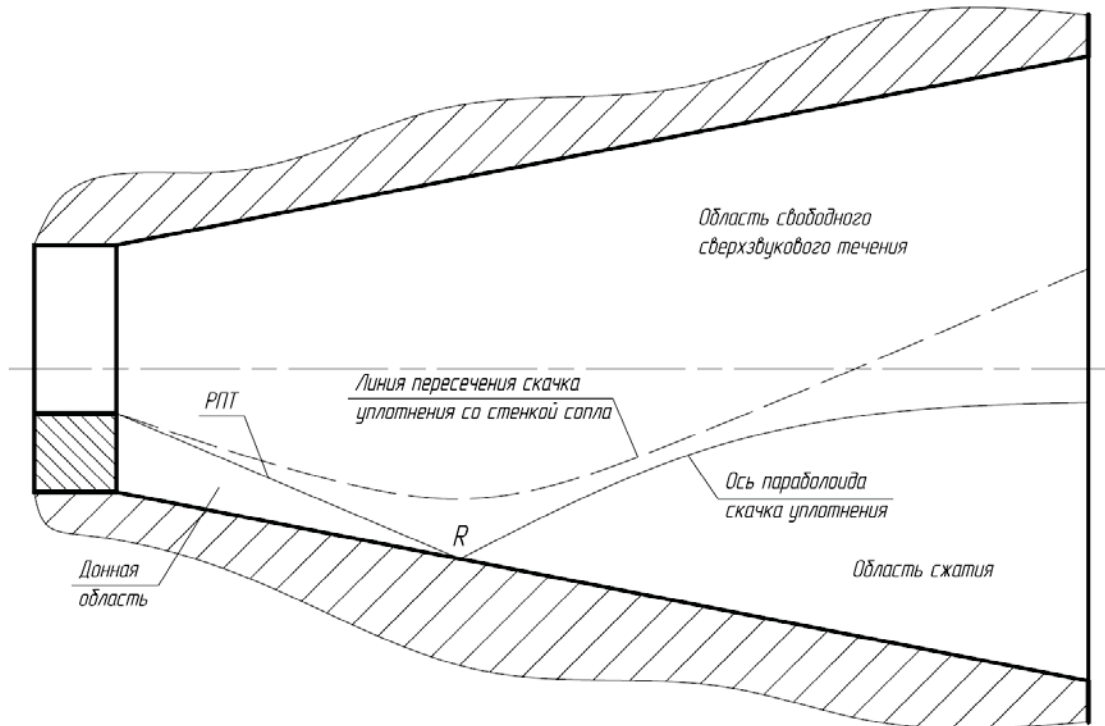


Рис. 3. Схема скачка уплотнения в меридиональном сечении сопла

Для проведения численного расчёта были построены сетки конечных элементов на основе моделей расчётных областей течения газа. Создание сеток проводилось в модуле CFX-Mesh на платформе ANSYS Workbench.

В таблице указаны диапазоны числа вершин, элементов и граней сеток от минимального до максимального из встречающихся значений среди всех степеней закрытия минимального сечения.

Таблица

Характеристики построенных сеток

Число вершин	174690 ÷ 318229
Число элементов:	206158 ÷ 374739
- Число тетраэдров	21375 ÷ 38344
- Число треугольных призм	1593 ÷ 2667
- Число шестигранников	147424 ÷ 273060
- Число пирамид	35275 ÷ 60668
Число граней	23529 ÷ 36931

В результате численных расчётов были получены поля распределения параметров рабочего тела по соплу при различных степенях перекрытия минимального сечения и при различных степенях выгорания сопла. Типичное распределение чисел Маха приведено на рисунке 4.

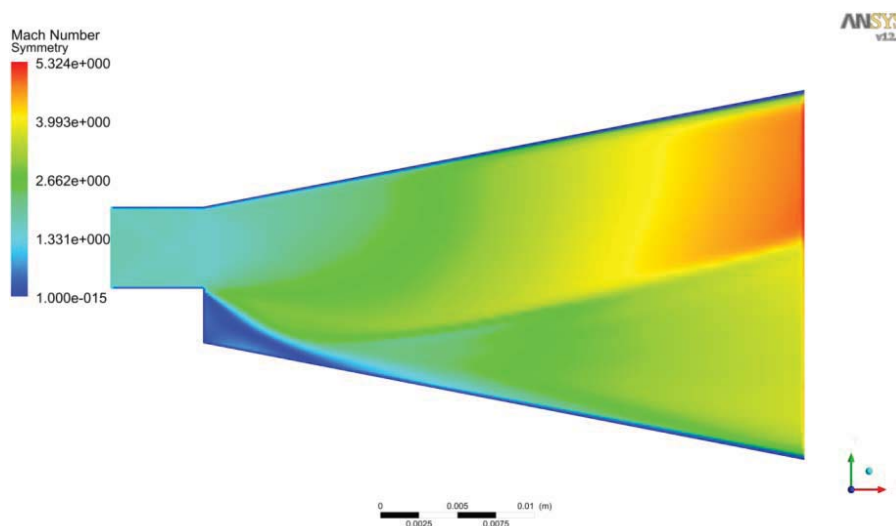


Рис. 4. Распределение числа Маха в плоскости симметрии сопла без выгорания при степени закрытия минимального сечения сопла – 40 %

На рисунке 5 показаны пространственные поверхности с одинаковым на них значением дивергенции скорости потока ($\text{div} \vec{W} = -175000 \frac{1}{\text{с}}$) при степени закрытия минимального сечения сопла 60 %. Приведённые результаты показывают структуру разделяющей поверхности тока, скачка уплотнения, отражённого от нижней части стенки сопла, и других поверхностей с большим градиентом скорости (как например, скачков уплотнения на входных кромках) по всему объёму расчётной модели.

Обработка результатов численного расчёта велась по выражениям, представленным в [1]–[4], в результате которой были получены значения искомых величин для каждой степени закрытия минимального сечения при различных степенях выгорания. Графические зависимости этих величин от степени закрытия и от степени разгара были построены линейной интерполяцией полученных значений. Степень разгара расширяющейся части сопла ε определяется выражением

$$\varepsilon = \frac{d_{ai} - d_{a0}}{d_{ак} - d_{a0}},$$

где d_{ai} – текущий диаметр выходного сечения; d_{a0} – начальный диаметр выходного сечения; $d_{ак}$ – диаметр выходного сечения сопла в конце работы.

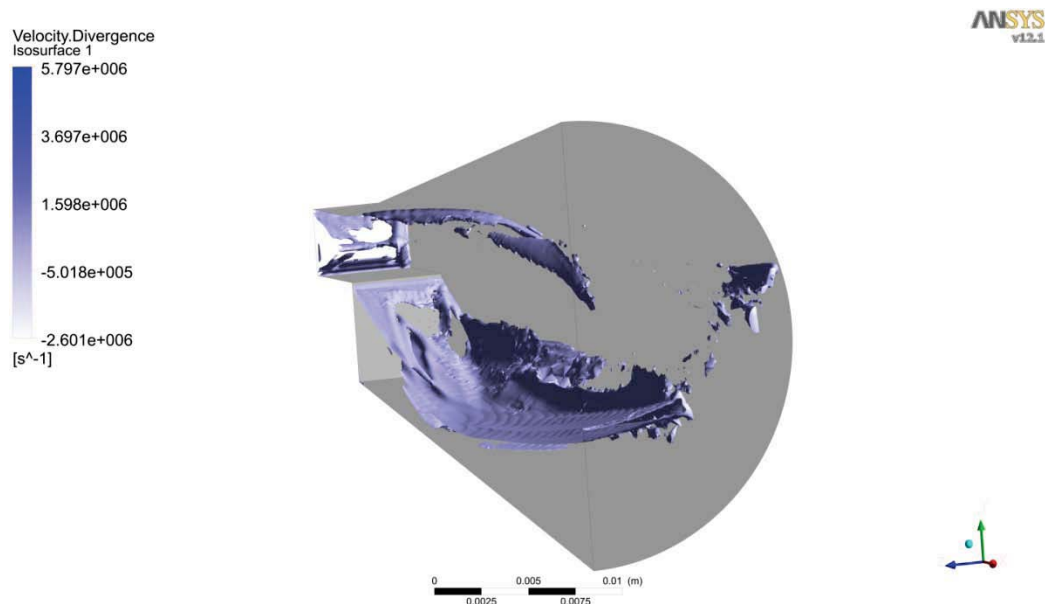


Рис. 5. Изоповерхности дивергенции скорости потока при степени закрытия минимального сечения сопла – 60 % (пространственный вид)

Боковая составляющая тяги, зависимость которой от степени перекрытия при постоянном давлении в КС показана на рисунке 6, получена путём интегрирования давления потока по поверхности стенки сопла в проекции на соответствующую ось

$$R_y = \int_{F_C} p \cdot dF \cdot \cos(\varphi_{ny}),$$

где F_C – площадь внутренней поверхности сопла; φ_{ny} – угол между вектором $\vec{n}$ и осью Y.

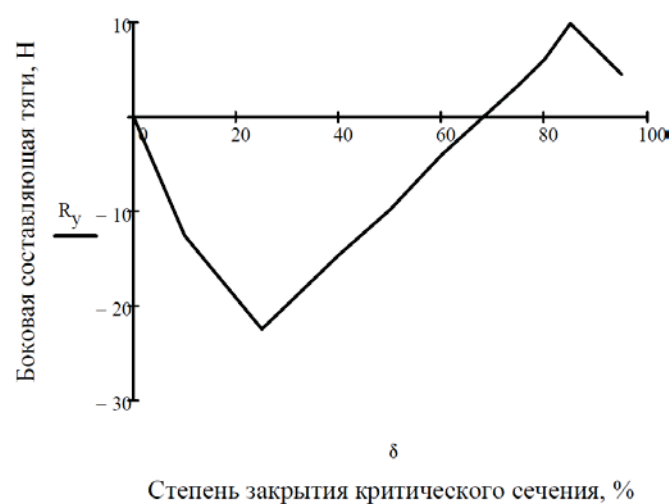


Рис. 6. Зависимость боковой составляющей тяги сопла от степени перекрытия минимального сечения ($p_k^* = const$)

На рисунке 6 видно, что при увеличении степени перекрытия минимального сечения заслонкой выше определённого порогового значения (для исследуемого модельного соплового блока – 68 %) направление боковой компоненты вектора тяги меняет на противоположное (для порогового значения боковая компонента равна нулю). Такой характер зависимости можно объяснить противоположно направленными вкладами в боковую составляющую тяги донной области и области сжатия за скачком. Давление в донной области ниже, чем в области свободного сверхзвукового потока для каждого поперечного сечения сопла. Следовательно, для каждого такого сечения и, соответственно, во всей области действия донной области на стенку сопла боковая компонента тяги направлена по оси Y . В области сжатия, наоборот, давление выше, чем в свободном сверхзвуковом потоке по всей области действия на стенку сопла и боковая составляющая тяги направлена против оси Y .

Величины вкладов этих областей зависят от степени перекрытия минимального сечения. При значении последнего меньше порогового донная область значительно меньше области сжатия и, следовательно, боковая составляющая тяги, создаваемая донной областью, меньше, чем составляющая, создаваемая областью сжатия. Тогда результирующая боковая составляющая будет направлена против оси Y . Наоборот, при степени закрытия выше порогового значения донная область увеличивается, и её вклад в боковую составляющую тяги сопла становится больше вклада области сжатия. Поэтому результирующая боковая составляющая будет направлена по оси Y .

При степени перекрытия минимального сечения заслонкой 25 % имеет место максимальное отклонение вектора суммарной тяги от оси сопла для случая, когда боковая составляющая тяги направлена против оси Y . Несовпадение значений степени перекрытия минимального сечения, когда боковая составляющая тяги и угол поворота вектора тяги равны нулю (68 % и 66 % соответственно), возникает из-за дискретности проводимого расчёта, т.е. большого шага степени закрытия (15 %) в окрестности реального значения.

При расчёте коэффициента расхода сопла $\mu_n = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_e}$, зависимость которого от

степени разгара представлена на рисунке 7, использовался действительный массовый расход газа в минимальном сечении, который определяется как

$$\dot{m}_{д.мин} = \sum_{i=1}^{i=N} \rho_i \cdot F_i \cdot U_i, \text{ где } N - \text{число точек (узлов) численного интегрирования в}$$

сетке минимального сечения; ρ – плотность газа; U – скорость потока. Идеальный массовый расход определялся формулой

$$\dot{m}_и = \frac{p_{\min}^* \cdot F_{\min}}{\sqrt{R \cdot T_{\min}^*}} \cdot A(k).$$

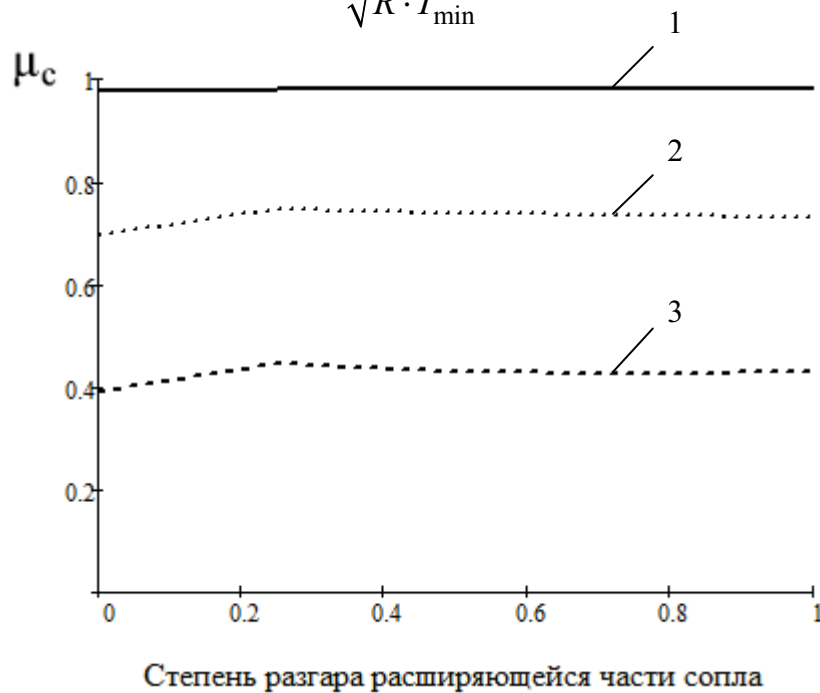


Рис. 7. Зависимость коэффициента расхода сопла от степени разгара сопла при степенях перекрытия минимального сечения – 0 (1); 25 % (2) и 40 % (3)

Коэффициент тяги сопла, зависимость которого от степени разгара представлена на рисунке 8, определяется как отношение осевой компоненты тяги сопла к произведению давления торможения в минимальном сечении сопла, площади минимального сечения и коэффициента расхода сопла

$$K_T = \frac{P_x}{p_{\min}^* \cdot F_{\min} \cdot \mu}.$$

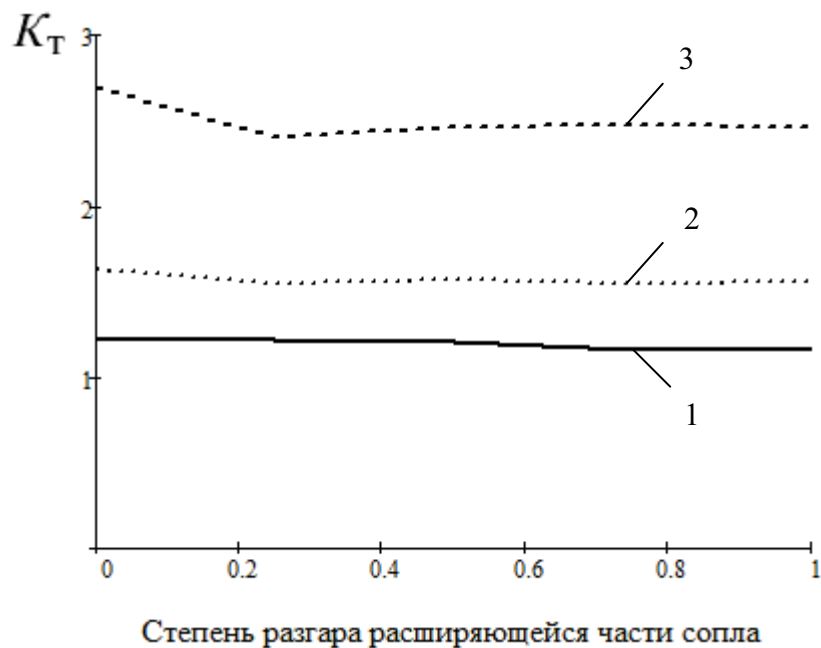


Рис. 8. Зависимость коэффициента тяги от степени разгара сопла. Обозначения аналогичны рис. 7.

Следующей задачей работы являлось математическое моделирование с учётом разгара сопла, что позволило определить влияние изменения геометрии на его тяговые и расходные характеристики. За разгар было принято увеличение угла раскрытия конуса сопла. При этом минимальное сечение не изменяло геометрическую форму. Действительно, при определённом подборе материала вкладыша минимального сечения реального соплового блока (например, молибден, карбид вольфрама) унос пренебрежимо мал.

По мере разгара сопла боковая поверхность увеличивается, что приводит к увеличению суммарной тяги. Также изменяется структура потока, что приводит к перераспределению давления по внутренней поверхности сопла. Из-за изменившейся геометрии и структуры потока меняется угол поворота вектора тяги. Эти факторы влияют на величину бокового усилия. Обработка результатов показала, что разгар сопла приводит к увеличению боковой составляющей тяги.

Минимальное сечение сопла в пределах допущений остаётся неизменным, поэтому идеальный массовый расход также неизменен. Как показала обработка результатов, действительный массовый расход по мере разгара меняется незначительно, что иллюстрирует рисунок 9. Тогда значение коэффициента массового расхода будет так же незначительно изменяться, как и значение действительного массового расхода. Тяга практически не меняется по мере выгорания сопла, поэтому разгар сопла не будет оказывать сильного влияния и на коэффициент тяги сопла.

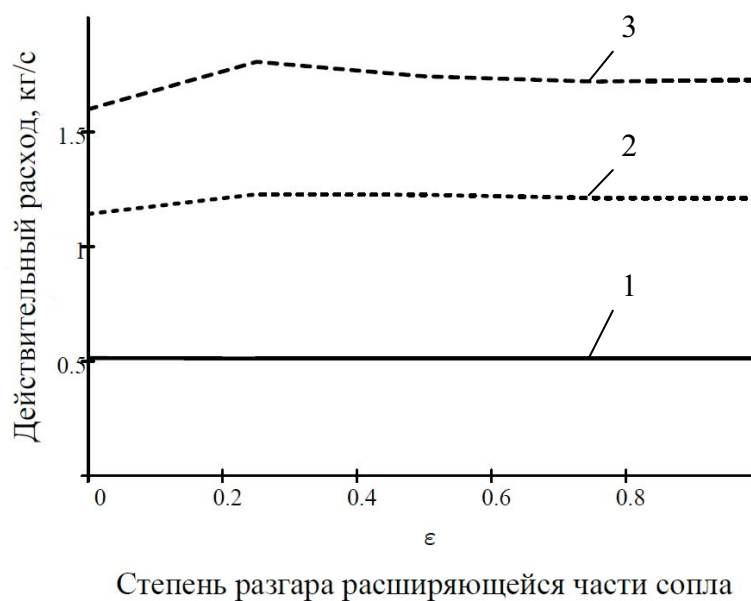


Рис. 9. Зависимость действительного массового расхода газа от степени разгара сопла.
Обозначения аналогичны рис. 7.

На основе проведённого математического моделирования расчётных исследований сделаны следующие выводы.

1. Разработана методика исследования характеристик модельного соплового блока с регулируемым минимальным сечением путём численного моделирования с использованием ANSYS. Проведён теоретический анализ структуры потока в сопловом блоке при регулировании за счёт изменения площади минимального сечения.

2. Получены распределения характеристик потока по длине сопла. Анализ показал, что завихрённый поток в донной области имеет статическую температуру ~ 1600 К при температуре торможения 1700 К, что должно быть учтено при подборе конструкции и материалов в этой области.

3. Выполнено моделирование и получены зависимости характеристик модельного соплового блока от степени разгара сопла, свидетельствующие о слабом влиянии разгара на осевую составляющую тяги и более сильном влиянии на величину бокового усилия, которая увеличивается за счёт разгара, что необходимо учитывать при составлении программы работы сопла.

Список литературы

- 1 Абугов Д. И., Бобылев В. М. Теория и расчёт ракетных двигателей твёрдого топлива. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.
- 2 Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Черенков А. С. Основы теории физико-химических процессов в тепловых двигателях и энергетических установках. – М.: Химия, 2000. – 520 с.
- 3 Васильев А. П., Кудрявцев В. М., Кузнецов В. А. и др. Основы теории и расчёта жидкостных ракетных двигателей. В 2 кн. Кн. 1. – М.: Высшая школа, 1993. – 383 с.
- 4 Дорофеев А. А. Основы теории тепловых ракетных двигателей. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 463 с.
- 5 Кузнецов Н. П., Черепов В. И., Калинин А. Е. и др. Испытание ракетных двигателей твёрдого топлива. В двух частях. Часть вторая. – М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. – 668 с.
- 6 Молчанов А. М. Расчёт охлаждения сверхзвукового сопла. – CAE-Services, 2009. – 15 с.
- 7 Черепов В. И., Бендерский Б. Я., Ильяшенко К. В. Исследование газодинамических процессов в двигателях управления // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. выпуск. – 2004. – С. 95-103.
- 8 Черепов В. И., Бендерский Б. Я., Саушин П. Н. Моделирование пространственного турбулентного течения и теплообмена в регуляторе расхода газа игольчатого типа РДТТ // Ракетно-космические двигательные установки: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. Москва, октябрь 2008 г. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – С. 59 – 60.