

## ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ И ВЫСОТЫ СТЕРЖНЕВОГО ИНТЕРЦЕПТОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СОПЛА РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2021

- К. О. Тищенко** инженер;  
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург;  
[Kirill1g@ya.ru](mailto:Kirill1g@ya.ru)
- Н. А. Брыков** кандидат технических наук, доцент;  
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург;  
[con-dolore@yandex.ru](mailto:con-dolore@yandex.ru)
- А. С. Беляева** инженер;  
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург;  
[belaeval239@yandex.ru](mailto:belaeval239@yandex.ru)

Представлено описание устройства для управления вектором тяги сопла – внутрисоплового интерцептора. На практике чаще всего они имеют форму заслонок и располагаются сразу за срезом сопла. Применяются такие устройства в корректирующих двигателях ракет. В данном исследовании интерцептор располагался внутри сопла и имел форму цилиндра, выдвигающегося из стенки канала. Выполнено численное моделирование течения газа через сопло с цилиндрическим интерцептором. Моделировалось несколько случаев – стержень располагался на разном расстоянии от среза и имел разную длину выдвижения. Моделирование выполнено на геометрической модели, представляющей собой проточную область соплового канала и область окружающей среды за срезом для моделирования струи газа. В качестве результатов численного моделирования представлены картины течения газа в сопловом канале, оснащённом цилиндрическим интерцептором, и в окружающем пространстве за соплом. Также представлены графики зависимостей бокового и осевого компонентов силы тяги от длины стержня для обоих случаев расположения стержня. Использование стержневых интерцепторов поодиночке не даёт значительного отклонения вектора тяги. Такие интерцепторы могут быть использованы в совокупности с другими корректирующими устройствами.

*Ракетный двигатель; сопло; интерцептор*

---

**Цитирование:** Тищенко К.О., Брыков Н.А., Беляева А.С. Параметрическое исследование влияния размещения и высоты стержневого интерцептора на характеристики сопла реактивного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 4. С. 52-58.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-4-52-58

### Введение

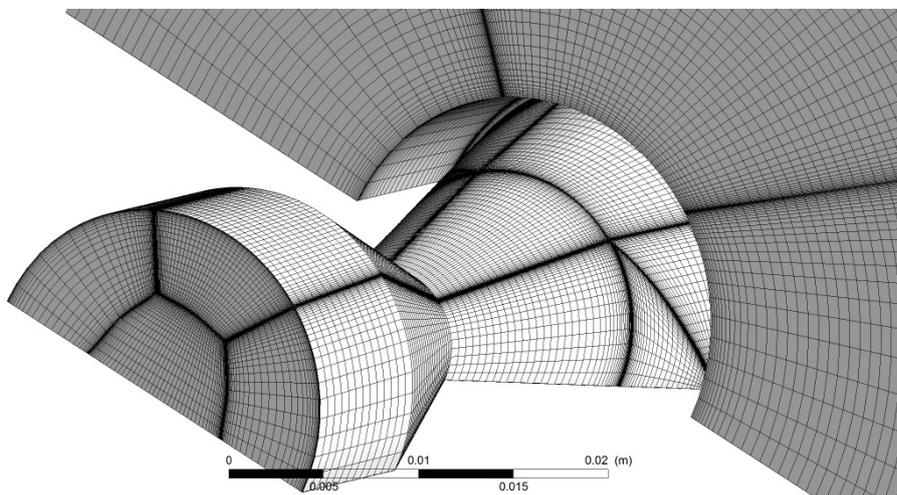
В ракетостроении широко применяются сверхзвуковые сопловые каналы, состоящие из плавно сужающейся дозвуковой и расширяющейся сверхзвуковой частей [1]. Сопла предназначены для преобразования потенциальной энергии продуктов сгорания в кинетическую энергию движения, то есть для создания тяги. Вектор тяги можно изменять как по величине, так и по направлению [2]. К устройствам, вызывающим отклонение струи от осевого направления, относятся внутрисопловые интерцепторы. Интерцепторы наиболее эффективны, когда располагаются в сверхзвуковой части канала. Кинетическая энергия потока здесь больше, чем в дозвуковой части канала, а значит поток оказывает большие механические нагрузки на интерцептор.

Интерцепторы могут иметь совершенно разные формы и размеры, располагаться на различном расстоянии от среза. Целью работы является параметрическое исследование влияния места расположения и длины выдвижения в сопловой канал реактивного

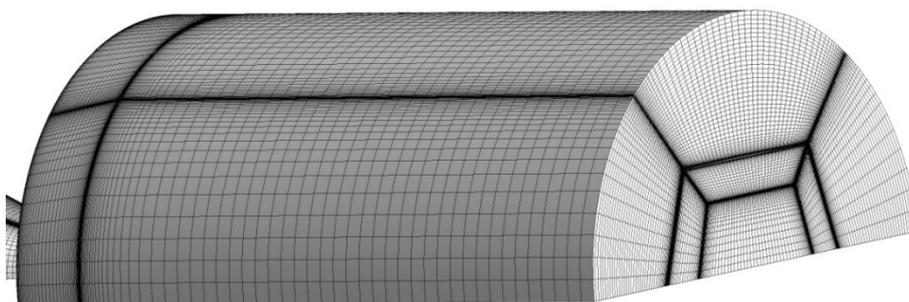


### Сеточная модель

Сеточная модель в сопловом канале представлена на рис. 3. Для расчёта построена структурированная гексаэдрическая сетка со сгущениями к пристеночным слоям. Сгущение выполнено как к стенкам соплового канала, так и к поверхности выдвинутого стержня. Сетка за соплом строится грубее, чем в канале, с постепенным увеличением размеров ячеек к границам области (рис. 4).



*Рис. 3. Сетка сопла*



*Рис. 4. Сетка за соплом*

### Математическая модель

Математическая модель представляет собой систему уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу. В качестве рабочей среды выбран воздух со свойствами совершенного газа. Система уравнений замыкается уравнениями модели турбулентности  $k - \omega$ :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0;$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\vec{\tau}});$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\bar{\vec{\tau}}_{eff} \vec{v}) \right);$$

$$\rho = \frac{p}{\frac{R}{M_w} T}$$

Здесь  $\rho$  – плотность среды;  $v$  – скорость;  $\bar{\tau}$  – тензор напряжений;  $E$  – внутренняя энергия;  $p$  – давление;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $M_w$  – молекулярная масса газа;  $T$  – температура;  $h_j$  – явная теплота компонента смеси  $j$ ;  $J_j$  – диффузионный поток компонента  $j$ ;  $k_{eff}$  – эффективная теплопроводность, определяется как  $k + k_t$ , то есть сумма теплопроводности среды и теплопроводности, определяемой моделью турбулентности.

### Результаты расчёта

С использованием программы Ansys Fluent расчётным путём получены поля распределения абсолютных величин скорости  $v$  на плоскости симметрии во всех случаях расположения и длины выдвижения стержня, а также без стержня.

Для случая расположения стержня вблизи среза соплового канала двигателя поля распределения скорости на плоскости симметрии при разной высоте выдвижения стержня из стенки  $h$  изображены на рис. 5. Для случая расположения стержня вблизи критического сечения поля распределения скорости изображены на рис. 6. В обоих случаях видно, как отклоняется поток от осевого направления по мере выдвижения стержня из стенки. Отклоняется также и структура скачков уплотнения.

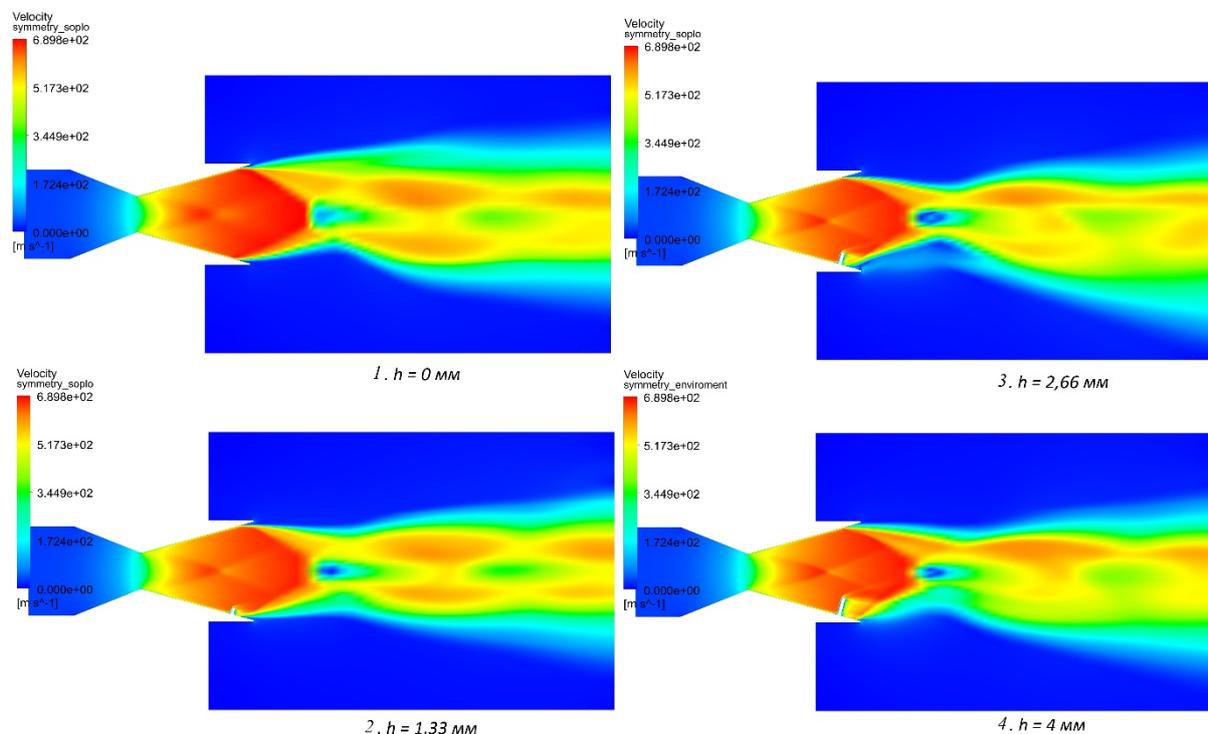


Рис. 5. Структура потока при размещении стержня вблизи среза. Поля распределения скорости на плоскости симметрии при разных длинах стержня

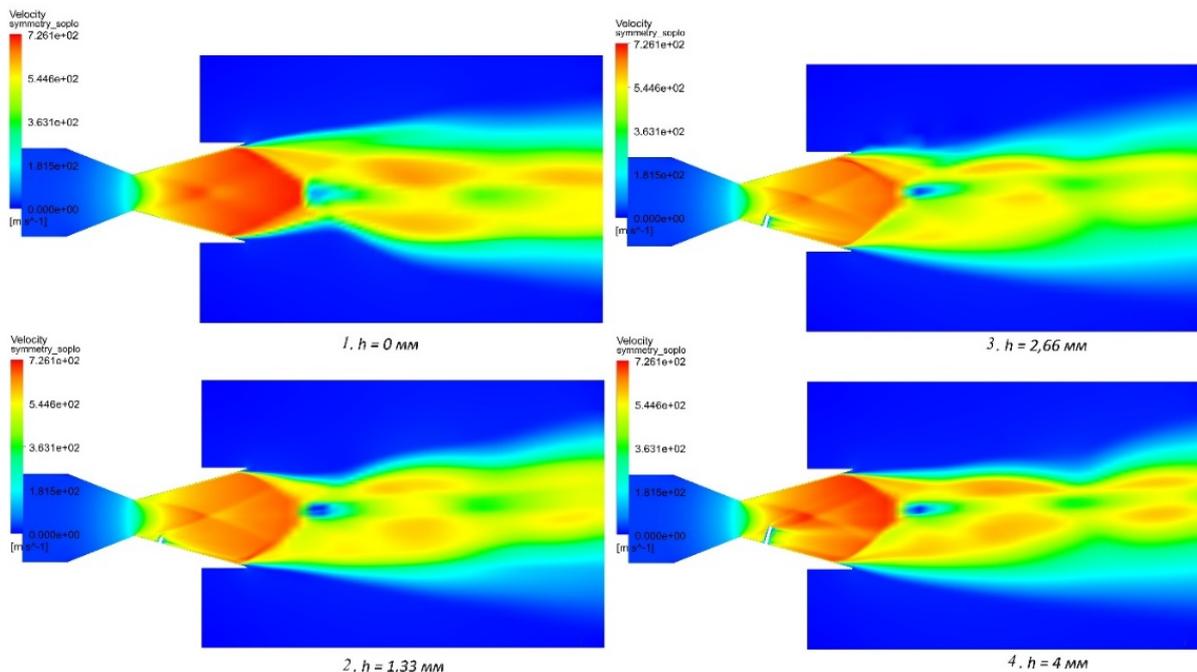


Рис. 6. Структура потока при размещении стержня вблизи критического сечения. Поля распределения скорости на плоскости симметрии при разных длинах стержня

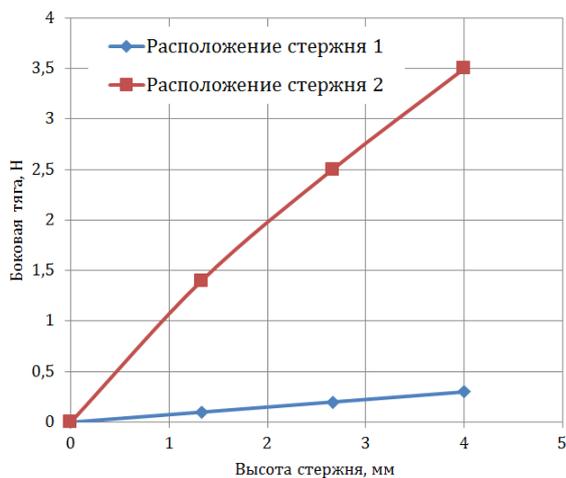


Рис. 7. Зависимости величины бокового компонента тяги от высоты стержня для обоих расположений стержня: 1 – вблизи критического сечения сопла; 2 – вблизи выхода из сопла

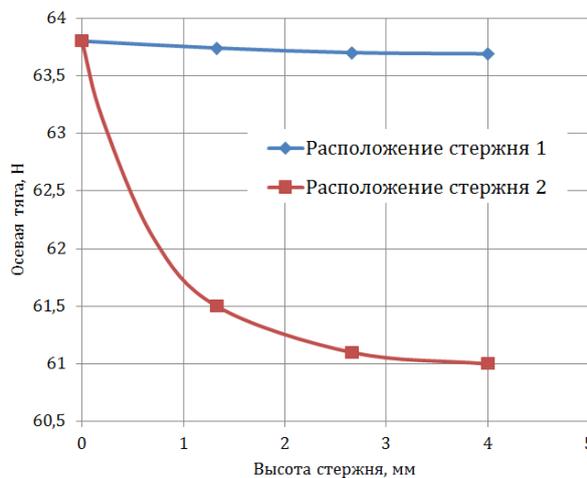


Рис. 8. Зависимости величины осевого компонента тяги от высоты стержня для обоих расположений стержня: 1 – вблизи критического сечения сопла; 2 – вблизи выхода из сопла

По мере выдвижения стержня из стенки поток отклоняется от осевого направления и возникает компонент силы тяги, направленный перпендикулярно оси соплового канала – боковая тяга. Зависимости бокового компонента тяги от длины выдвижения стержня изображены на рис. 7. По мере её увеличения уменьшается величина силы, направленной вдоль оси сопла – осевой тяги. Изменение осевого компонента вектора тяги можно проследить на рис. 8.

Видно, что стержень, расположенный вблизи критического сечения, оказывает большее влияние на отклонение вектора тяги от осевого направления по сравнению с расположением стержня вблизи среза сопла. Это может быть связано с тем, что стержень, расположенный вблизи критического сечения, занимает большую часть от площади поперечного сечения канала.

Видно, что компоненты тяги не сильно изменяются в зависимости от длины выдвижения стержня, что говорит о необходимости применения интерцепторов других геометрических форм для более существенного отклонения вектора тяги и более существенного увеличения маневренности летательного аппарата.

### Заключение

Проведено параметрическое численное моделирование течения по соплу со стержневым интерцептором.

Применение интерцепторов в сопловых каналах как устройств изменения вектора тяги имеет большой потенциал. Необходимо исследовать большое количество форм, размеров и мест расположения интерцепторов, чтобы подобрать наиболее подходящую конфигурацию для решения конкретной задачи.

### Библиографический список

1. Фахрутдинов И.Х., Котельников А.В. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твёрдого топлива: учебник для машиностроительных вузов. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.

2. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Яковчук М.С. Многопараметрическая оптимизация органов управления вектором тяги, основанных на вдуве струи газа в сверхзвуковую часть сопла // Вычислительные методы и программирование. 2018. Т. 19, № 2. С. 158-172. DOI: 10.26089/NumMet.v19r214

## PARAMETRIC STUDY OF THE INFLUENCE OF LOCATION AND EXTENSION HEIGHT OF THE ROD INTERCEPTOR ON JET ENGINE NOZZLE CHARACTERISTICS

© 2021

- K. O. Tishchenko** Engineer;  
Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D.F. Ustinov,  
Saint-Petersburg, Russian Federation;  
[Kirill1g@ya.ru](mailto:Kirill1g@ya.ru)
- N. A. Brykov** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor;  
Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D.F. Ustinov,  
Saint-Petersburg, Russian Federation;  
[con-dolore@yandex.ru](mailto:con-dolore@yandex.ru)
- A. S. Belyaeva** Engineer;  
Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D.F. Ustinov,  
Saint-Petersburg, Russian Federation;  
[belaeva1239@yandex.ru](mailto:belaeva1239@yandex.ru)

Modern aircraft need increased maneuverability to maintain a competitive position. One way to improve this characteristic is to use methods to adjust the thrust vectors of a jet engine nozzle. One method of controlling nozzle thrust is the use of nozzle interceptors – devices of various shapes that extend into the nozzle channel and cause an uneven distribution of pressure along the walls of the channel. The extension of the rod interceptor near the critical section of the nozzle creates a greater lateral force than the extension of the rod near the exit section. The dependence of the lateral force on

the extension height is nonlinear. The article presents a description of a nozzle interceptor of a cylindrical shape extended from the channel wall. Numerical simulation of gas flow in the nozzle with a cylindrical interceptor was carried out. The patterns of gas flow in the channel and in the environment outside the nozzle are presented. The plots of the lateral and axial components of the thrust force against the interceptor rod length are also presented for both cases of the rod location. Rod interceptors can be used in combination with other correcting devices.

*Rocket engine; nozzle; interceptor*

---

*Citation:* Tishchenko K.O., Brykov N.A., Belyaeva A.S. Parametric study of the influence of location and extension height of the rod interceptor on jet engine nozzle characteristics. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 4. P. 52-58. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-4-52-58

## References

1. Fakhrutdinov I.Kh., Kotel'nikov A.V. *Konstruktsiya i proektirovanie raketnykh dvigateley tverdogo topliva: uchebnyk dlya mashinostroitel'nykh vuzov* [Construction and design of solid-propellant rocket engines. Textbook for mechanical engineering universities]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1987. 328 p.
2. Volkov K.N., Emelyanov V.N., Yakovchuk M.S. Multiparameter optimization of operating control by the thrust vector based on the jet injection into the supersonic part of a nozzle. *Numerical Methods and Programming*. 2018. V. 19, no. 2. P. 158-172. (In Russ.). DOI: 10.26089/NumMet.v19r214