

Научная статья
УДК 621.45.018.2
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178464>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ТОПЛИВА ИЗ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКИ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Евгений Алексеевич Прокопенко^{1✉}, Евгений Юрьевич Герасименко²

^{1,2}Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

¹yka@mil.ru✉

Аннотация. Представлено исследование расходной характеристики центробежной форсунки методами численного моделирования и методом проливок компонентов ракетного топлива. Для определения угла распыла форсунки были проведены численные исследования в программном комплексе ANSYS CFX. В качестве объекта исследования была разработана трехмерная модель центробежной форсунки. Для определения массового расхода через форсунку были проведены замеры объема истекающего жидкого топлива за определенный промежуток времени при соответствующем перепаде давления в баке с горючим и окружающей средой. Результаты проведенных исследований показывают, что расходная характеристика реальной центробежной форсунки может отличаться от идеальной, что скорее всего связано с отклонением геометрических характеристик от номинальных значений в

процессе изготовления форсунок, а также с погрешностью полученных данных с соответствующих датчиков на проливочном стенде.

Ключевые слова: центробежная форсунка, коэффициент расхода, ракетное топливо, экспериментальные исследования

Для цитирования: Прокопенко Е.А., Герасименко Е.Ю. Исследование процесса истечения топлива из центробежной форсунки жидкостного ракетного двигателя // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178464>

Original article

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF FUEL OUTFLOW FROM THE CENTRIFUGAL NOZZLE OF A LIQUID ROCKET ENGINE

Evgeny A. Prokopenko^{1✉}, Evgeny U. Gerasimenko²

^{1,2}Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Saint Petersburg, Russia

¹vka@mil.ru✉

Abstract. The article presents a study of the consumption characteristics of a centrifugal nozzle by numerical modeling methods using the ANSYS CFX software package with verification of the results obtained by the method of spills used by the component of rocket fuel.

Numerical studies were carried out in the ANSYS CFX software package to determine the nozzle spray angle. A three-dimensional model of a centrifugal nozzle was developed as an object of research.

Similar studies were carried out at various pressure drops on the nozzle using expressions for the flow coefficients of an ideal centrifugal nozzle (μ_f) with a tangential inlet.

Measurements of the volume of liquid fuel flowing out over a certain period of time were carried out with a corresponding pressure drop in the fuel tank and the environment to determine the mass flow through the nozzle. Pressure losses in the fuel line were previously measured, taking into account local resistances and losses along the length of the pipeline lines. Accounting for pressure losses is necessary to ensure the specified accuracy of determining fuel consumption through the nozzle. Alcohol is used as a fuel of a given concentration at the current values of ambient temperature and pressure. These data made it possible to calculate the fuel density and its kinematic viscosity coefficient.

Analysis of the values of the coefficients of mf obtained by experimental and computational methods shows that the theoretical value of μ_f for an ideal centrifugal nozzle is significantly less than the real value. The values of μ_f are constant at different values of the pressure drop at the nozzle, with the same geometric parameters of the nozzle. These differences are beginning to manifest themselves to a lesser extent in terms of mass expenditures.

The results of the conducted studies show that the flow characteristics of a real centrifugal nozzle may differ from the ideal one. On the one hand, this contradiction is due to the deviation of geometric characteristics from nominal values during the manufacture of

nozzles and the geometric parameters of the flow sections and the location of sensor equipment on the pouring stand, on the other hand. This leads to the fact that it is necessary after the manufacture of the nozzle to carry out its spillage in order to clarify the design values of the consumption characteristics in the end. The results obtained can be used in the development of the technological process of manufacturing new injectors and refining defective ones.

Keywords: centrifugal nozzle, flow coefficient, rocket fuel, experimental research

For citation: Prokopenko E.A., Gerasimenko E.U. Investigation of the process of fuel outflow from the centrifugal nozzle of a liquid rocket engine. *Trudy MAI*, 2024, no. 134.

URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178464>

Введение

Камера сгорания является одним из важнейших агрегатов жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), характеристики которой определяют основные характеристики ЖРД – тягу и удельный импульс [1]. Сложность создания камеры сгорания с совершенными техническими характеристиками (высоким удельным импульсом, малым весом и габаритами и др.) связана с напряженным термодинамическим и физико-химическим процессами в камере сгорания, обусловленными полнотой преобразования внутренней энергии компонентов топлива в кинетическую энергию продуктов сгорания [2,3].

Для обеспечения полноты сгорания топлива необходима, специфическая для ЖРД, подготовка топлива [4]. Эту функцию в ЖРД выполняет форсуночная головка, имеющая собственную схему расположения форсунок горючего и окислителя. Таким

образом, качество распыла топлива и расходная характеристика ЖРД в основном определяется индивидуальными параметрами каждой форсунки [5, 6].

Постановка задачи исследования

Для сгорания топлива в минимальных объемах камеры ее головка с помощью смесительных элементов должна обеспечить равномерное распределение топлива в поперечном сечении камеры как по соотношению компонентов, так и по расходонапряженности; размер капель поданного в камеру топлива должен быть как можно более равномерным и достаточно малым, чтобы одновременно и быстрее завершился процесс их испарения [7].

Взаимное расположение форсунок горючего и окислителя и их гидравлические параметры должны способствовать не только равномерному распределению топлива, но и обеспечить активный подвод тепла из камеры сгорания к распыленному топливу для его быстрого испарения и способствовать созданию условий в камере для интенсивного перемешивания компонентов топлива.

Качественное перемешивание топлива в условиях ограничения поперечных габаритных размеров камеры сгорания и минимальных перепадов давления обеспечивается применением центробежных форсунок [8, 9].

Коэффициент расхода идеальной центробежной форсунки с тангенциальным входом определяется с помощью выражения [10]:

$$\mu_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\phi^2} + \frac{A^2}{1-\phi}}}, \quad (1)$$

где ϕ – коэффициент живого сечения форсунки, равный $1 - r_e^2 / r_c^2$;

A – коэффициент пропорциональности, равный $R_{\text{BX}} \cdot r_c / r_{\text{BX}}^2$.

Обозначения соответствующих радиусов, входящих в формулу (1) приведены на рисунке 1.

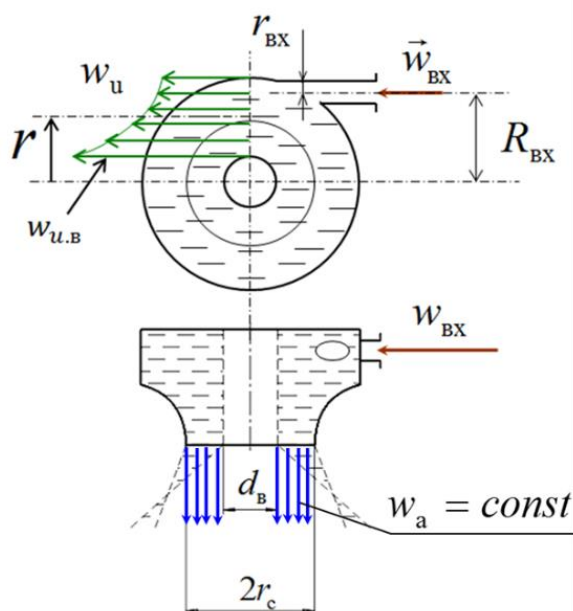


Рисунок 1 – Схема истечения струи из центробежной форсунки

Принцип максимального расхода через форсунку дает условия, при которых устойчивым будет такое течение жидкости, где будет обеспечен ее максимальный расход [11]:

$$\mu_{\phi}(\phi) \xrightarrow{\max} \frac{1}{\phi^2} + \frac{A^2}{1-\phi} \rightarrow \min \quad (2)$$

Следовательно, для обеспечения условия (2), необходимо определить экстремум функции $f(\phi) = \frac{1}{\phi^2} + \frac{A^2}{1-\phi}$. Исходя из сказанного, условие (2) преобразуется к виду:

$$A = (1-\phi) \sqrt{\frac{2}{\phi^3}} \quad (3)$$

Выражение (3) отображает соотношение между геометрическими параметрами центробежной форсунки, при которых обеспечивается максимальный расход [12]. Массовый расход через центробежную форсунку для жидкого компонента топлива определяется следующим выражением:

$$\dot{m}_\phi = \mu_\phi F_\phi \sqrt{2\Delta p_\phi \rho_\tau} \quad (4)$$

Результаты численных исследований истечения из центробежной форсунки

Для определения угла распыла форсунки были проведены численные исследования в программном комплексе ANSYS CFX [13]. В качестве объекта исследования была разработана трехмерная модель центробежной форсунки, представленная на рисунке 2.

Проведение численного анализа производилось в четыре этапа [14]:

- 1) создание трехмерной модели проточной части;
- 2) импортирование трехмерной модели в сеткогенератор ANSYS ICEM CFD или Meshing и построение расчетной сетки;
- 3) импортирование созданной сетки в препроцессор ANSYS CFX;
- 4) передача модели на решение.

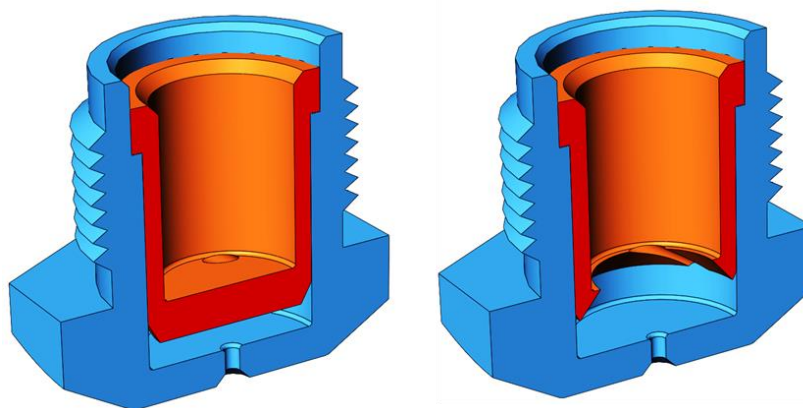


Рисунок 2 – Трехмерная модель центробежной форсунки в разрезе

В решателе подготовленная модель проходит процесс нивелирования невязок (т.е. падение невязок до достаточно низкого уровня и выход на постоянные значения). Полученное в итоге численное решение уравнений Навье-Стокса [15, 16] удовлетворяет всем условиям, заданным в препроцессоре. Если условия и модели были заданы правильно, эти значения в идеале соответствуют тем же параметрам, которые могут быть получены, например, в физическом эксперименте, проведенном с точно такими же условиями.

В постпроцессоре производится анализ результатов, полученных в решателе: построение полей распределения скалярных параметров и векторных полей, построение графиков, получение числовых значений точечных и осредненных параметров, создание и просмотр видео нестационарных процессов и т.д.

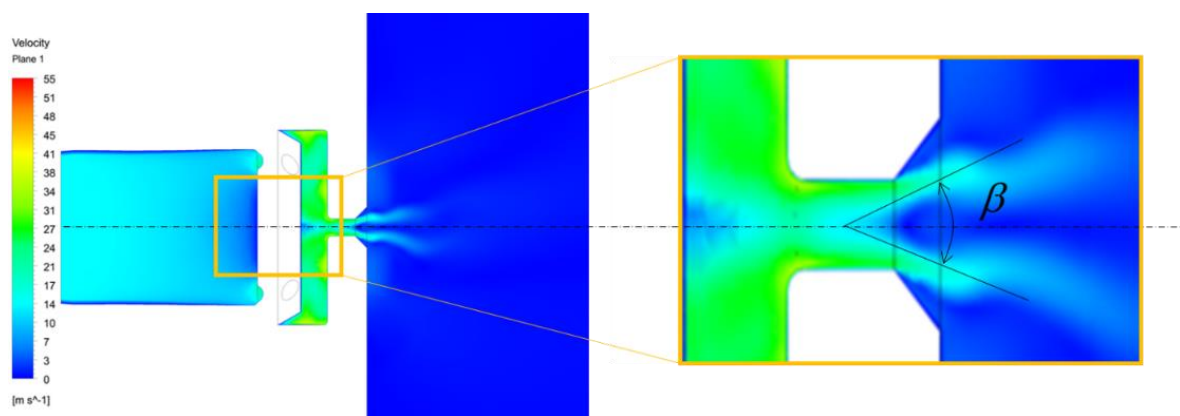


Рисунок 3 – Результаты моделирования в Ansys распределения скорости и угла распыла (β) в осевом сечении при истечении спирта из центробежной форсунки

На рисунке 3 представлены результаты численного моделирования процесса распыла жидкого топлива с характеристиками и начальными условиями [4] при входе в форсунку, соответствующими условиям экспериментального пролива

центробежной форсунки при перепаде давления 6 МПа между баком горючего и истечением в окружающую среду [17].

Результаты экспериментальных исследований истечения из центробежной форсунки

Для определения массового расхода через форсунку были проведены замеры объема истекающего жидкого топлива за определенный промежуток времени при соответствующем перепаде давления в баке с горючим и окружающей средой. Предварительно были проведены расчеты потерь напора в магистрали горючего, с учетом местных сопротивлений и потерь по длине. Учет потерь напора необходим для обеспечения заданной точности определения расхода горючего через форсунку. В качестве горючего используется спирт заданной концентрации при текущих значениях температуры и давления окружающей среды. Эти данные позволяют рассчитать плотность горючего и его коэффициент кинематической вязкости.

Эксперименты проводились на системе подачи горючего (рисунок 4) стенда огневых испытаний модельных ЖРД, подробное описание которого представлено в [18, 19], реализующим принципы описанные в [2, 20].

В таблице 1 приведены осредненные значения многократных проливов через форсунку с $r_b = 2,25$ мм.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунках 5–7.

На рисунке 5 представлена зависимость массового расхода через центробежную форсунку от перепада давления в баке горючего на форсунке, по оси ординат отложено значение $[\dot{m}_\phi] = \text{г/с}$, а по оси абсцисс – $[\Delta p_\phi] = \text{МПа}$.

Таблица 1 – Исходные данные для эксперимента

$V, \text{мл}$	40	67	80	91	96	416
$t, \text{с}$	20	20	20	20	20	20
$\dot{m}_\phi, \text{г/с}$	1,7	2,8	3,35	3,85	4,05	17,5
$\Delta p_\phi, \text{МПа}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7

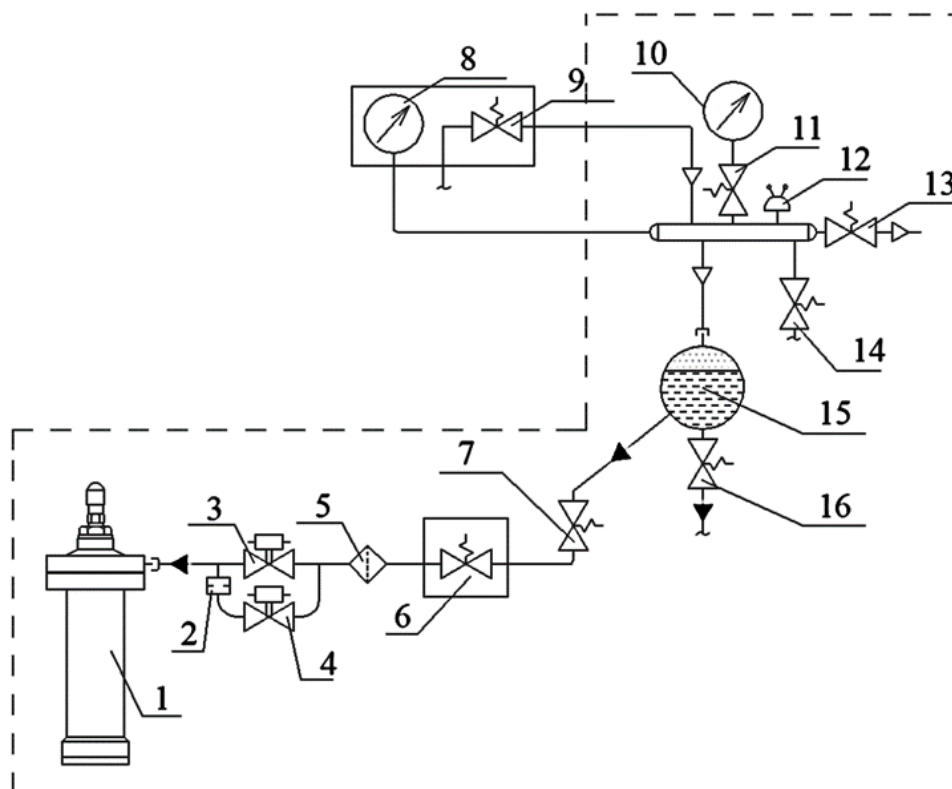


Рисунок 4 – Система подачи горючего стенда огневых испытаний модельных ЖРД:

- 1– камера сгорания, 2 – жиклер, 3,4 – отсечные клапаны,5– фильтр,
6,7,9,11,13,14,16– вентиль, 15 – бак горючего, 8,10 – манометр.

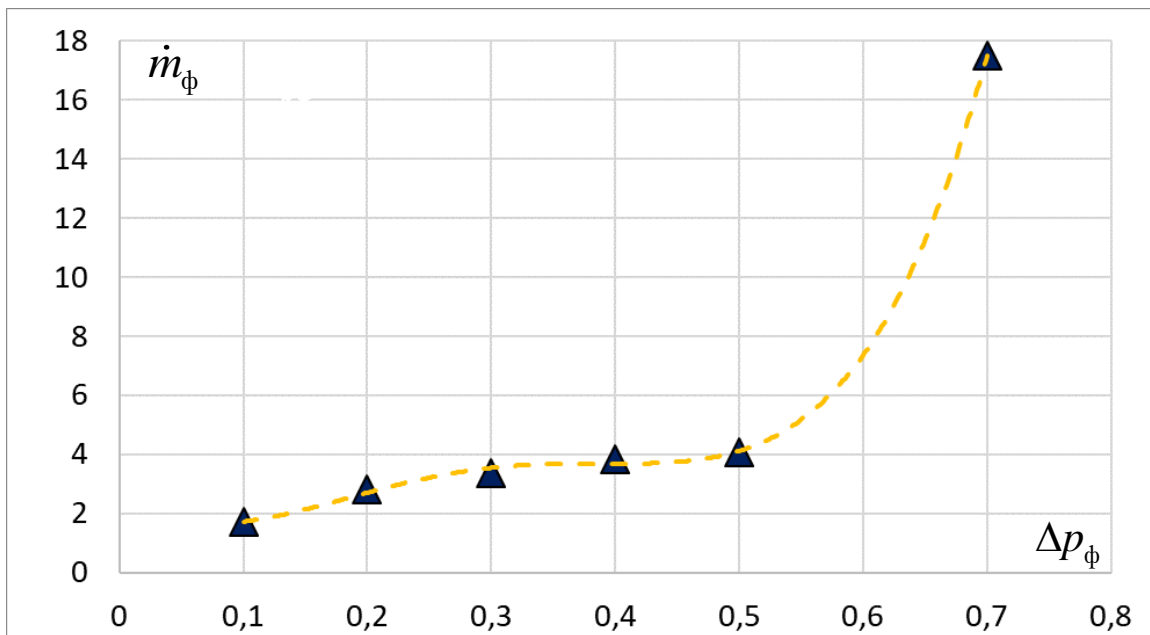


Рисунок 5 – Экспериментальная зависимость массового расхода через центробежную форсунку от перепада давления

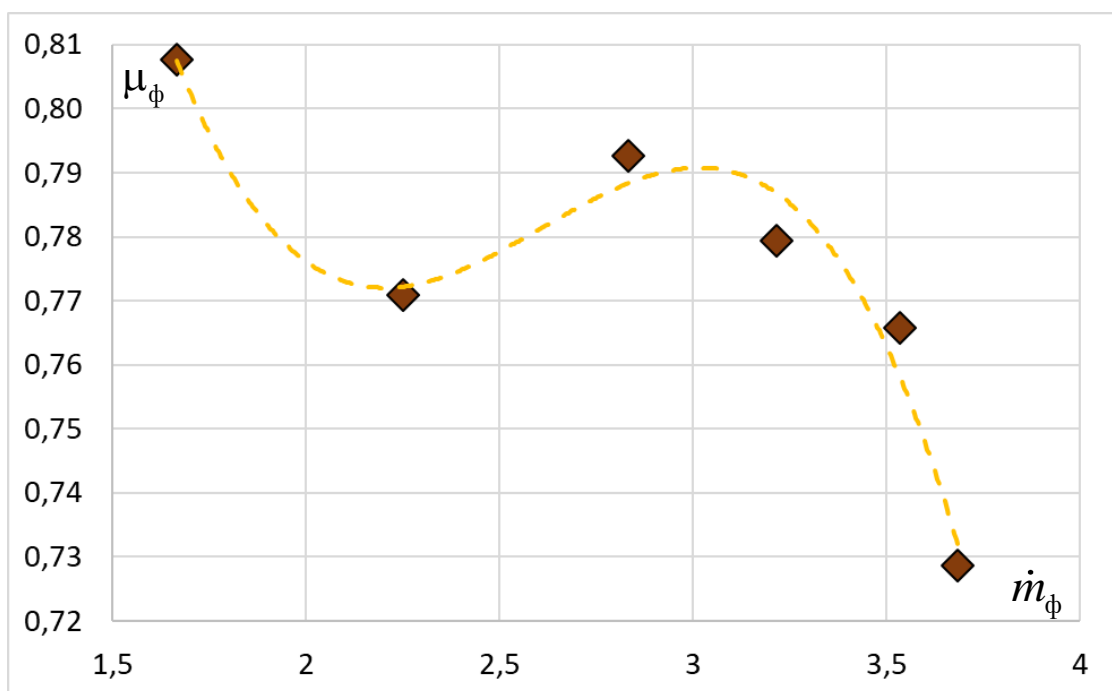


Рисунок 6 – Экспериментальная зависимость коэффициента расхода центробежной форсунки от массового расхода через нее

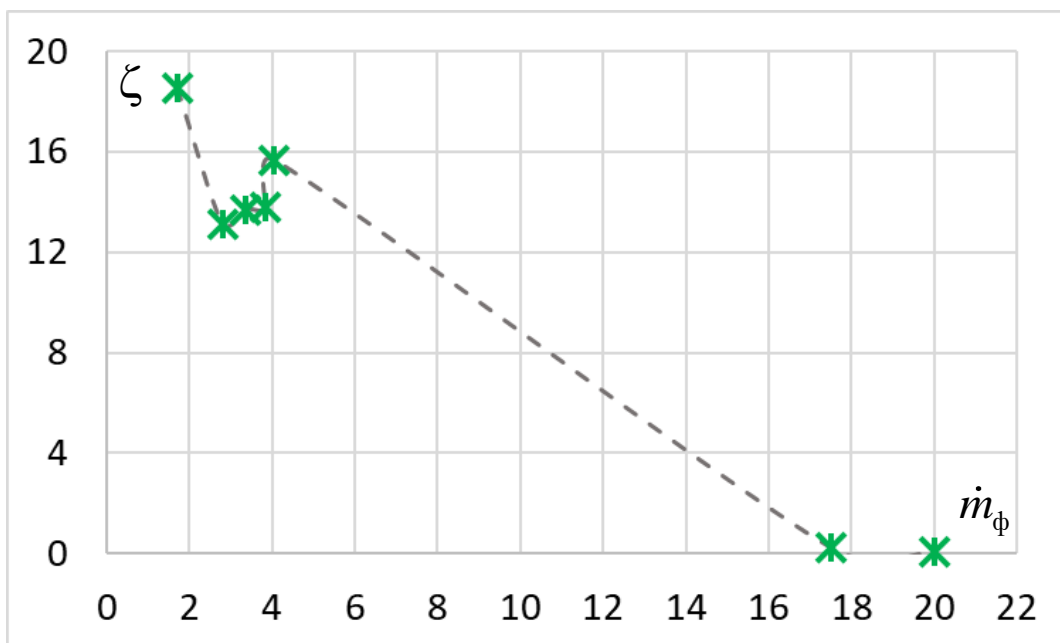


Рисунок 7 – Экспериментальная зависимость коэффициента потерь напора на центробежной форсунке от массового расхода через нее

Анализ результатов исследования

Как видно из рисунка 7, коэффициент потерь напора на центробежной форсунке имеет тенденцию к уменьшению с увеличением подачи компонента вплоть до очень низких значений. Однако в области расходов от 2,8 г/с до 4,05 г/с имеется две области возникновения локального минимума и максимума соответственно. Вероятнее всего это связано с тем, что в области данных расходов возникают такие перепады давления, которые приводят к возникновению и схлопыванию кавитационных зон в полости форсунки. Эта гипотеза требует подтверждения и проведения дополнительных исследований.

Анализ значений μ_ϕ , полученных экспериментальным и расчетным путем с помощью выражений (1) и (4), показывает, что теоретическое значение μ_ϕ для идеальной центробежной форсунки значительно меньше реального значения,

полученного при проливе, и остается постоянным при различных значениях Δp_ϕ , для форсунки той же геометрии,. Однако в пересчете на массовые расходы эти различия начинают проявляться в меньшей степени. В таблице 2 представлены значения относительных расхождений между экспериментальными и теоретическими значениями \dot{m}_ϕ , выраженные в процентном отношении, в зависимости от перепада давления Δp_ϕ .

Таблица 2 – Различие между экспериментальными и теоретическими значениями \dot{m}_ϕ

Δp_ϕ , МПа	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$\Delta \dot{m}_\phi$, %	17	13	15,4	13,9	12,4	8

Таким образом, значения массового расхода через реальную центробежную форсунку получилось выше, чем через идеальную, однако имеется тенденция к снижению различий при повышении Δp_ϕ , что может иметь объяснение, с учетом уравнения Бернулли, что вклад перепад пьезометрического напора становится в разы выше, чем местные потери напора на форсунке (см. рисунок 7). Этот факт свидетельствует о том, что при изготовлении форсунок выражения для расчета расходных характеристик идеальных форсунок могут носить лишь оценочный характер на начальном этапе проектирования.

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что расходная характеристика реальной центробежной форсунки может отличаться от идеальной.

Данное противоречие связано с отклонением геометрических характеристик от номинальных значений в процессе изготовления форсунок, с одной стороны, и геометрическими параметрами проходных сечений и расположением датчиковой аппаратуры на проливочном стенде, с другой стороны. Таким образом, это приводит к тому, что необходимо после изготовления форсунки проводить ее пролив с целью уточнения проектных значений расходной характеристики. Полученные результаты могут быть использованы при разработке техпроцесса изготовления новых и доработке отбракованных форсунок.

Список источников

1. Васильев А.П., Кудрявцев В.М., Кузнецов В.А. и др. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. В 2 кн. – М.: Высшая школа, 1993. Кн. 1. - 383 с.
2. Лебединский Е.В., Калмыков Г.П. и др. Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование. - М.: Машиностроение, 2008. – 511 с.
3. Мингалев С.В., Казимарданов М.Г. Применение численных методов для доводки камер сгорания авиационных двигателей по характеристикам распыла топлива // Труды МАИ. 2021. № 117. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=156325>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-19](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-19)
4. Бакланов А.В., Краснов Д.С., Гараев А.И. Исследование параметров факела за форсункой со струйной и закрученной подачей топлива // Труды МАИ. 2020. № 113. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=117960>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-03](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-03)

5. Бакланов А.В., Краснов Д.С., Гараев А.И. Газодинамический расчет экспериментальной установки для испытания отсека камеры сгорания ГТД // Труды МАИ. 2020. № 114. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118882>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-05](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-05)
6. Матюнин О.О., Бачев Н.Л., Бульбович Р.В. Численное моделирование течения в полости струйно-струйной жидкостной форсунки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2015. № 43. С. 19–33.
7. Kim S.E., Choudhury D., Patel B. Computations of Complex Turbulent Flows Using the Commercial Code Fluent: Modeling Complex Turbulent Flows. ICASE/LaRC Interdisciplinary Series in Science and Engineering. 1999, vol. 7, pp. 259–276. DOI: [10.1007/978-94-011-4724-8_15](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4724-8_15)
8. Barth T.J., Jespersen D. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes // AIAA 27th Aerospace Sciences Meeting. Reno, 1989. DOI: [10.2514/6.1989-366](https://doi.org/10.2514/6.1989-366)
9. Бачев Н.Л., Матюнин О.О., Козлов А.А., Бачева Н.Ю. Численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания жидкостных ракетных двигателей с дожиганием генераторного газа при сверхкритических параметрах // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 2. С. 108–116.
10. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
11. Козлов А.А., Абашев В.М. Расчет и проектирование жидкостного ракетного двигателя малой тяги. - М.: МАИ, 2003. - 36 с.

12. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, no. 3, pp. 269–289. DOI: [10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
13. Шаблий Л.С., Кривцов А.В., Колмакова Д.А. Компьютерное моделирование типовых гидравлических и газодинамических процессов двигателей и энергетических установок в ANSYS. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 108 с.
14. Сназин А.А., Шевченко А.В., Панфилов Е.Б. Исследование локальной адаптации сетки конечных элементов в задаче обтекания тела сверхзвуковым потоком // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168165>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-06](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-06)
15. Shih T.H., Liou W.W., Shabbir A. et al. A new-eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows– model development and validation // Computers Fluids, 1995, no. 24 (3), pp. 227–238.
16. Reynolds W.C. Fundamentals for turbulence modeling and simulation. Lecture Notes for Von Karman Institute Agard, 1987, Report № 755.
17. Знаменская И.А., Гвоздева Л.Г., Знаменский Н.В. Методы визуализации в механике газа. - М.: МАИ, 2001. – 57 с.
18. Поспищенко В.И., Прокопенко Е.А., Герасименко Е.Ю. Экспериментальный стенд для разработки и совершенствования перспективных методов контроля функционирования и испытаний жидкостных ракетных двигателей // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2020. № 673. С. 190–197.

19. Прокопенко Е.А., Герасименко Е.Ю., Флора А.Н. Исследование процессов функционирования двигательных установок космических аппаратов с помощью стенда огневых испытаний модельных ЖРД малой тяги // I Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Малые космические аппараты» (Анапа, 29 июля 2021): сборник статей. – Анапа: ВИТ «ЭРА», 2021. С. 92–102.
20. Галеев А.Г., Захаров Ю.В., Макаров В.П., Родченко В.В. Проектирование испытательных стендов для экспериментальной отработки объектов ракетно-космической техники. – М.: Изд-во МАИ, 2014. – 283 с.

References

1. Vasil'ev A.P., Kudryavtsev V.M., Kuznetsov V.A. et al. *Osnovy teorii i rascheta zhidkostnykh raketnykh dvigatelei* (Fundamentals of the theory and calculation of liquid rocket engines), Moscow, Vysshaya shkola, 1993, 383 p.
2. Lebedinskii E.V., Kalmykov G.P. et al. *Rabochie protsessy v zhidkostnom raketnom dvigatele i ikh modelirovanie* (Working processes in a liquid rocket engine and their modeling), Moscow, Mashinostroenie, 2008, 511 p.
3. Mingalev S.V., Kazimardanov M.G. *Trudy MAI*, 2021, no. 117. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=156325>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-19](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-19)
4. Baklanov A.V., Krasnov D.S., Garaev A.I. *Trudy MAI*, 2020, no. 113. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=117960>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-03](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-03)
5. Baklanov A.V., Krasnov D.S., Garaev A.I. *Trudy MAI*, 2020, no. 114. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118882>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-05](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-05)

6. Matyunin O.O., Bachev N.L., Bul'bovich R.V. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2015, no. 43, pp. 19–33.
7. Kim S.E., Choudhury D., Patel B. *Computations of Complex Turbulent Flows Using the Commercial Code Fluent: Modeling Complex Turbulent Flows*. ICASE/LaRC Interdisciplinary Series in Science and Engineering. 1999, vol. 7, pp. 259–276. DOI: [10.1007/978-94-011-4724-8_15](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4724-8_15)
8. Barth T.J., Jespersen D. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes, *AIAA 27th Aerospace Sciences Meeting*. Reno, 1989. DOI: [10.2514/6.1989-366](https://doi.org/10.2514/6.1989-366)
9. Bachev N.L., Matyunin O.O., Kozlov A.A., Bacheva N.Yu. *Aerospace MAI Journal*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 108–116.
10. Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim po soprotivleniyam* (Handbook of hydraulic resistances), Moscow, Mashinostroenie, 1975, 559 p.
11. Kozlov A.A., Abashev V.M. *Raschet i proektirovanie zhidkostnogo raketnogo dvigatelya maloi tyagi* (Calculation and design of a low-thrust liquid rocket engine), Moscow, MAI, 2003, 36 p.
12. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, no. 3, pp. 269–289. DOI: [10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
13. Shablii L.S., Krivtsov A.V., Kolmakova D.A. *Komp'yuternoe modelirovanie tipovykh gidravlicheskih i gazodinamicheskikh protsessov dvigatelei i energeticheskikh ustanovok v ANSYS* (Computer modeling of typical hydraulic and gas dynamic processes of engines and power plants in ANSYS), Samara, Izd-vo Samarskogo universiteta, 2017, 108 p.

14. Snazin A.A., Shevchenko A.V., Panfilov E.B. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168165>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-06](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-06)
15. Shih T.H., Liou W.W., Shabbir A. et al. A new-eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows– model development and validation, *Computers Fluids*, 1995, no. 24 (3), pp. 227–238.
16. Reynolds W.C. *Fundamentals for turbulence modeling and simulation*. Lecture Notes for Von Karman Institute Agard, 1987, Report № 755.
17. Znamenskaya I.A., Gvozdeva L.G., Znamenskii N.V. *Metody vizualizatsii v mekhanike gaza* (Visualization methods in gas mechanics), Moscow, MAI, 2001, 57 p.
18. Pospishenko V.I., Prokopenko E.A., Gerasimenko E.Yu. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2020, no. 673, pp. 190–197.
19. Prokopenko E.A., Gerasimenko E.Yu., Flora A.N. *I Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoi nauki po napravleniyu «Malye kosmicheskie apparaty»: sbornik statei*. Anapa, VIT «ERA», 2021, pp. 92–102.
20. Galeev A.G., Zakharov Yu.V., Makarov V.P., Rodchenko V.V. *Proektirovanie ispytatel'nykh stendov dlya eksperimental'noi otrabotki ob"ektov raketno-kosmicheskoi tekhniki* (Design of test benches for experimental testing of objects of rocket and space technology), Moscow, Izd-vo MAI, 2014, 283 p.

Статья поступила в редакцию 01.11.2023

Одобрена после рецензирования 12.11.2023

Принята к публикации 27.02.2024

The article was submitted on 01.11.2023; approved after reviewing on 12.11.2023; accepted for publication on 27.02.2024