

Научная статья

УДК 533.17

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16406>

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО СОПЛА ИНЖЕКТОРА МАССИВНОЙ ГЕЛИЕВОЙ СТРУИ

В. М. Тимохин ✉, **Д. Д. Коробко**, **Л. И. Нуртдинова**,
В. Г. Капралов, **В. Ю. Сергеев**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ v.timokhin@spbstu.ru

Аннотация. В работе описана конструкция и принцип действия клапана, предназначенного для испытаний прототипов ключевых элементов системы массивной газовой инжекции: седла и сверхзвукового сопла. Приведены результаты расчетов параметров сверхзвукового сопла, близких к оптимальным для выбранной конструкции клапана. Выполнено моделирование газовых потоков через седло и сопло, рассчитаны параметры формируемой струи на выходе системы инжекции в ближнем поле сопла. Обоснован выбор «ступенчатой» формы профиля сопла для первых испытаний. Сделана оценка требований к точности изготовления прототипов сопел.

Ключевые слова: численное моделирование, магнитное удержание, высокотемпературная плазма, газовая струя, выключение разряда

Финансирование. Работа поддержана госкорпорацией «Росатом» и Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Федерального проекта 3 (U3), № FSEG-2023-0018 «Разработка и создание систем струйной и пеллет инжекции с повышенными производительностью и ресурсом».

Для цитирования: Тимохин В. М., Коробко Д. Д., Нуртдинова Л. И., Капралов В. Г., Сергеев В. Ю. Моделирование сверхзвукового сопла инжектора массивной гелиевой струи // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2023. Т. 16. № 4. С. 63–75. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16406>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16406>

SIMULATION OF A SUPERSONIC NOZZLE OF A MASSIVE HELIUM JET INJECTOR

V. M. Timokhin ✉, **D. D. Korobko**, **L. I. Nurtdinova**,
V. G. Kapralov, **V. Yu. Sergeev**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ v.timokhin@spbstu.ru

Abstract. The paper describes the design and operating principle of a valve designed for testing the prototypes of key elements of a massive gas injection system: a seat and a supersonic nozzle. The calculation results for supersonic nozzle parameters close to optimal for the selected valve design have been presented. The simulation of gas flows through the seat and nozzle was carried out, the parameters of the formed jet at the injection system outlet in the nozzle near field were calculated. The choice of the "stepped" nozzle profile for the first tests was justified. An assessment was made of the requirements for the accuracy of manufacturing prototype nozzles.

Keywords: numerical simulation, magnetic confinement, high-temperature plasma, gas jets, discharge shutdown

Funding: The research was supported by “ROSATOM” State Corporation and the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation within the framework of the Federal Project 3 (U3) “Development and Creation of Jet & Pellet Injection Systems with Increased Performance and Resource” (No. FSEG-2023-0018).

For citation: Timokhin V. M., Korobko D. D., Nurtdinova L. I., Kapralov V. G., Sergeev V. Yu., Simulation of a supersonic nozzle of a massive helium jet injector, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 16 (4) (2023) 63–75. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16406>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Одной из принципиальных задач при создании термоядерной энергетики является недопущение либо существенное снижение вероятности срыва разряда токамака. Эта проблема пока полностью не решена, она находится только в процессе решения [1].

Изложим кратко ее суть. Если срыв тока разряда неизбежен, то в качестве крайней меры должны быть приняты быстрые действия по смягчению последствий, чтобы снизить вероятность значительного повреждения вакуумной камеры и других элементов конструкции токамака-реактора. Поскольку тепловая и магнитная энергия плазмы эффективно сохраняется в объеме камеры во время срыва, ее можно только перераспределить внутри камеры, но нельзя удалить. Этого перераспределения можно достичь, например, путем введения достаточно большого количества примесей. В качестве такой примеси используется, как правило, группа благородных газов (гелий, неон и аргон), которая предназначена для генерации изотропного излучения энергии плазмы на первую стенку и нацелена на предотвращение концентрированной нагрузки.

Наиболее распространенной технологией инжекции, применяемой для быстрой доставки примесей, служит массивная газовая инжекция (МГИ). Один из прототипов МГИ описан в следующем разделе этой статьи.

Важным элементом системы МГИ является сверхзвуковое сопло Лаваля, которое обеспечивает формирование струи инжектируемой примеси в вакуумную камеру токамака [2]. Параметры сопла определяют скорость и распределение инжектируемого газа, что влияет на глубину проникновения примеси и задает распределение источника излучения внутри плазменного шнура. На докритическом (сужающемся) участке сопла движение газа происходит с дозвуковыми скоростями. В критическом (самом узком) сечении сопла локальная скорость газа достигает звуковой, а на закритическом (расширяющемся) участке газовый поток движется со сверхзвуковыми скоростями. Внутренняя энергия газа преобразуется в кинетическую энергию его направленного движения. Кроме того, газ, проходя через сопло на значительной скорости, не успевает передать его стенкам заметное количество своей тепловой энергии. Эта особенность процесса позволяет считать его адиабатическим, что существенно упрощает его моделирование.

В задачи данной работы входило моделирование процесса истечения массивной струи газа из системы МГИ для различных видов сопла и выбор его оптимального вида.

Критерием эффективности сопла служит достижение максимальной скорости газа при минимальном угле разлета струи на выходе сопла (это позволяет увеличить глубину проникновения инжектируемого газа в плазму).

Другим важным критерием для выбора прототипа сопла служит простота технологии его изготовления. Малые размеры критического сечения и сложная форма профиля сопла требуют привлечения лазерных и гальванопластических технологий. Возможность изготовления сопла без сложных процедур металлообработки создает существенное преимущество при сопоставимых параметрах струи, формируемой соплом.

Моделирование было выполнено в поддержку стендовых испытаний прототипа клапана для массивной инжекции газа и не предполагало изменений параметров потоков газа и геометрии сопла в широких пределах.

Основная цель расчетов состояла в поисках оптимального распределения параметров потока газа в ближнем поле на выходе сопла. Оптимальные значения набора параметров необходимы для проектирования диагностики стенда системы МГИ, а также для моделирования взаимодействия газовых струй с высокотемпературной плазмой установок с магнитным удержанием.

Изложение полученных результатов построено следующим образом. Сначала описан принцип действия и устройство газового клапана, предназначенного для формирования сверхзвуковой струи. Затем представлены результаты расчетов основных параметров сверхзвукового сопла. Далее приведено описание алгоритма построения расчетной сетки и результатов, полученных в ходе моделирования, а также представлен анализ процесса истечения газа через сверхзвуковое сопло. В заключение сформулированы основные выводы работы.

Газовый клапан для испытаний прототипов седла и сопла

Метод МГИ относительно прост в реализации, но имеет тенденцию к формированию локального источника излучения примеси в периферийных областях плазмы, что может вести к низкой эффективности ввода примеси в центральные области плазменного шнура [3]. Позиционирование клапана МГИ, согласно оригинальному дизайну [4], позволяет приближать его к плазме, что увеличивает эффективность ввода примеси. Основная идея дизайна – обеспечить подвижность клапана на значительном расстоянии от привода, что позволяет перемещать выходной срез сопла клапана вплоть до последней замкнутой магнитной поверхности (*англ.* Last Closed Magnetic Surface (LCMS)). Система подачи клапана обеспечивает его перемещение от положения за пределами шибера патрубка установки до положения рядом с LCMS. Перемещение сопла может достигать расстояния более метра, что обычно превышает размеры нейтронной защиты установок с нейтронами, включая токамак-реактор ИТЭР (первое название – международный экспериментальный термоядерный реактор, *англ.* International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)). Такое перемещение может быть достаточно быстрым, что открывает перспективы использования такого варианта МГИ в радиационной обстановке токамака-реактора. Это избавляет от использования направляющих трубок для доставки струи от сопла клапана до плазмы, сокращает время срабатывания системы, уменьшает угловое расширение газовой струи.

Задаются следующие расчетные характеристики инжектора массивной газовой струи гелия:

- поток газа – не менее 10^{23} ат/с (в максимуме);
- общее число инжектируемых частиц – не менее $5 \cdot 10^{23}$;
- время срабатывания системы (появление газа на выходе сопла после получения сигнала запуска от системы предсказания срыва тока разряда) – не более 3 мс;
- время доставки газа от выхода сопла до плазмы – менее 1 мс (при расположении сопла на расстоянии менее 10 см от LCMS).

С целью экспериментальных исследований процессов формирования газовой струи был разработан специальный клапан, обеспечивающий относительно легкий доступ к соплу, а также к седлу – элементу конструкции, предназначенному для надежной фиксации сопла и перекрытия газового потока.

На рис. 1 показан общий вид клапана для испытаний прототипов седла и сопла. В клапан можно независимо устанавливать как сменное седло 4, так и сменное сопло 2. Клапан допускает работу с давлениями газа до нескольких десятков атмосфер. Выходной патрубком 1 обеспечивает его подключение к вакуумной схеме стенда через порт с грибковым типом уплотнения, которое используется для установки вакуумметрических датчиков типа ПМТ-6М.

Конструкция клапана включает электромагнит, магнитная цепь которого состоит из якоря 6, стопа 10 и набора магнитопроводов. Рабочий зазор магнитной цепи располагается между якорем и стопом. На нержавеющей трубке 8, в которую впаян стоп, установлена катушка электромагнита 9. Катушка подключается к внешнему импульсному источнику

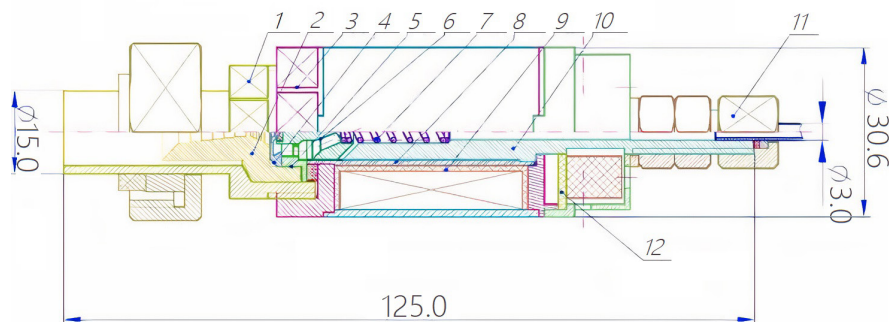


Рис. 1. Схема газового клапана для испытаний прототипов седла и сопла:

1 – выходной патрубок, 2 – сменное сопло, 3 – нижний магнитопровод, 4 – сменное седло, 5 – сепаратор, 6 – якорь с тарелкой, 7 – пружина, 8 – разделительная нержавеющая трубка, 9 – катушка электромагнита, 10 – стоп, 11 – входная газовая магистраль, 12 – печатная плата

питания через клеммы, установленные на печатной плате 12. К входному штуцеру стопа подключается внешняя газовая магистраль 11 для подачи рабочего газа в клапан. Внутри стопа и якоря располагается пружина 7, обеспечивающая закрытие клапана по окончании электрического импульса.

Принцип работы газового клапана следующий. Рабочий газ поступает из входной магистрали во внутренний канал стопа, затем через каналы в якоре поступает в окружающий якорь объем внутри нержавеющей трубки и через сепаратор 5 подается к сменному седлу 4, канал которого закрыт тарелкой якоря 6 клапана. При срабатывании электромагнита тарелка клапана отходит от седла и газ сквозь седло проходит в сменное сопло 2, в котором и формируется сверхзвуковая газовая струя, истекающая через патрубок 1 в вакуумный объем, на котором установлен клапан. Для замены седла и/или сопла достаточно, отключив газовую магистраль и напустив атмосферу в вакуумный объем, отвинтить выходной патрубок от нижнего магнитопровода 3. После этого можно вставить новые седло и сопло, заменив уплотнения (при необходимости).

Рабочий цикл применения клапана включает следующую последовательность действий.

На этапе подготовки клапана к работе необходимо подключить его к импульсному источнику питания и проверить срабатывание электромагнита клапана.

Следующим шагом надо подсоединить входную газовую магистраль 11 и откачать ее и внутренний объем клапана, состоящий из каналов в стопе 10, якоря 6 и сепаратора 5, для удаления рабочего газа и воздуха, заполнявших магистраль и внутренний объем клапана до начала работы.

После откачки следует заполнить входную газовую магистраль и входной внутренний объем клапана новым рабочим газом.

Затем, с соблюдением мер безопасности, следует проверить срабатывание клапана уже с рабочим газом и его выхлопом в атмосферу.

Далее клапан устанавливается на вакуумный объем, в который будет импульсно напускаться рабочий газ, и необходимо выполнить откачку вакуумного объема.

В процессе работы импульсный источник питания разряжает конденсаторную батарею на катушку 9 электромагнита клапана. В результате формируется магнитный поток через цепь магнитопроводов, стоп 10 и якорь 6. Якорь притягивается к стопу и отрывает тарелку от седла 4. На выходе седла формируется передний фронт газового потока, который проходит сквозь сменное сопло 2, где формируется сверхзвуковая газовая струя.

Расчет параметров и оптимизация газовых потоков, формируемых этими элементами конструкции, составляет предмет данной работы. По мере разряда батареи источника, магнитное поле в электромагните ослабевает и клапан закрывается пружиной 7, что формирует задний срез газового импульса и завершает рабочий цикл клапана.

Расчет параметров сверхзвукового сопла для МГИ

Расчет параметров сопла Лавалья был выполнен с помощью методов и формул для одномерных стационарных течений идеального газа в каналах [5, 6]. Был рассчитан вариант

сопла Лавала конического профиля, взятый за основу при изготовлении прототипов сопла и седла. При этом использовались известные газодинамические соотношения и законы сохранения:

$$\frac{T}{T_0} = 1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \lambda^2, \quad (1)$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}, \quad (2)$$

$$\frac{p}{p_0} = \left(1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \lambda^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}, \quad (3)$$

где p_0 , ρ_0 , T_0 – давление, плотность и температура покоящегося газа; γ – показатель адиабаты; λ – приведенная скорость,

$$\lambda = \frac{v}{c_{S*}} = \frac{v}{\sqrt{\frac{2\gamma R}{(\gamma + 1)M} T_0}}$$

(c_{S*} – скорость звука при критических значениях параметров ρ_* , T_* , p_*).

Параметры ρ_* , T_* , p_* следуют выражениям:

$$T_* = \frac{2}{\gamma + 1} T_0, \quad \rho_* = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \rho_0, \quad p_* = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} p_0.$$

Параметры газа должны принимать свои экстремальные значения в самом узком сечении сопла Лавала, называемом «критическим сечением». Проектируемое сопло должно обеспечивать массовый поток гелия $G = 3,8 \cdot 10^{-4}$ кг/с. В соответствии с законом сохранения потока и заданными значениями давления, температуры и потока на входе сопла, определяется диаметр критического сечения:

$$d_{crit} = 2 \sqrt{\frac{G \sqrt{T_0}}{B \pi p_0}}, \quad (4)$$

где $B = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \sqrt{\gamma \frac{m_{He}}{R}} = 0,016 \frac{\text{К}^{0,5} \cdot \text{с}}{\text{м}}$.

В данном расчете для гелия получаем значение $d_{crit} = 0,73$ мм.

При проектировании конического сопла необходимо также правильно выбрать угол раствора дозвуковой и сверхзвуковой частей сопла [7 – 9]. Рекомендуемые значения угла β раствора сверхзвуковой части сопла в конических соплах не должны превышать 15° [9].

Для представленных ниже расчетов были выбраны углы дозвуковой и сверхзвуковой частей сопла (α и β , соответственно: $\alpha = 26^\circ$, $\beta = 12^\circ$), что определило значения длины этих частей как 10 и 20 мм соответственно.

При вычислении диаметра выходного сечения обычно обращаются к газодинамической функции приведенного расхода:

$$q(\lambda) = \frac{\rho v}{\rho_* c_{S*}} = \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \lambda \frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \lambda \left(1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}. \quad (5)$$

Из условия сохранения потоков при стационарном течении следует, что

$$\rho_2 v_2 S_2 = \rho_* c_{S*} S_{crit} \rightarrow S_2 = \frac{\rho_* c_{S*}}{\rho_2 v_2} S_{crit} = \frac{S_{crit}}{q(\lambda_2)}, \quad (6)$$

а сечение на выходе сопла выражается как

$$d_2 = d_{crit} \sqrt{\frac{1}{q(\lambda_2)}}. \quad (7)$$

В рассматриваемом случае диаметр выходного сечения $d_2 = 4$ мм был задан конструктивными параметрами клапана (см. рис. 1). Поэтому значение газодинамической функции приведенного расхода, найденное из равенств (5), позволяет получить значение приведенной скорости λ_2 и скорости v_2 , реализующейся на выходе сопла:

$$q(\lambda_2) = \left(\frac{d_{crit}}{d_2} \right)^2 = 0,014 \rightarrow \lambda_2 = 1,97 \rightarrow v_2 = c_{s^*} \lambda_2 = 1,74 \text{ км/с}. \quad (8)$$

Результаты моделирования

Рассчитанный вышеописанным способом конический профиль сопла Лаваля имел следующие параметры:

- диаметр входного сечения $d_1 = 4,0$ мм;
- диаметр критического сечения $d_{crit} = 0,7$ мм;
- диаметр сечения выхода $d_2 = 4,0$ мм;
- длина сверхзвуковой части сопла $l_2 = 20$ мм;
- полный угол раствора стенок $\beta = 12^\circ$;
- длина дозвуковой части $l_1 = 10$ мм;
- полный угол раствора стенок $\alpha = 26^\circ$.

Для первых экспериментов с прототипом клапана МГИ была выбрана геометрия конического сопла с этими параметрами, упрощенная для изготовления. Было спроектировано сопло со ступенчатыми дозвуковой и сверхзвуковой частями, близкое к коническому профилю, которое технологически можно изготавливать методом последовательного сверления заготовки (далее для краткости употребляется термин «ступенчатое сопло»). Для обеих частей сопла было задано по 7 ступеней. Шаг по диаметру ступеней был выбран равным 0,5 мм, шаг по длине – 1,4 мм для дозвуковой части и 2,8 мм – для сверхзвуковой. Перед входной частью сопла было установлено седло цилиндрической формы, с длиной, равной диаметру входного сечения, – 4 мм, необходимое для запирания газового потока и фиксации данного элемента в конструкции клапана.

Эскиз сопла с седлом и примером построенной расчетной сетки для моделирования изображен на рис. 2. Расчетная область была разделена на две зоны. В области сопла и седла, где параметры потока газа меняются быстрее, была построена более мелкая сетка, размер элемента которой составил 0,05 мм; в основном объеме, в пристеночной области, для улучшения разрешения пограничного слоя, размер сеточной ячейки был уменьшен до 0,01 мм для 10 ячеек, прилегающих к стенке. В области диагностической камеры, куда происходит инжекция струи, размер элемента сетки составил 0,15 мм.

В данном разделе представлены результаты численного моделирования потока гелия через такое сопло. Подобное деление, с теми же характерными размерами элемента сетки, применялось и в расчетах с другими профилями сопла (их основные результаты приведены в следующем разделе).

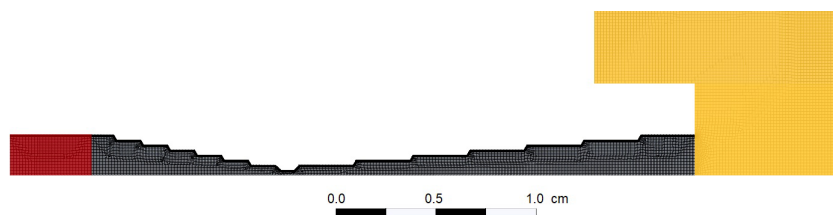


Рис. 2. Пример расчетной сетки для ступенчатого сопла Лаваля с седлом (последнее выделено красным цветом). Показана область диагностической камеры (выделена желтым цветом)

Моделирование было выполнено с помощью CFD-пакета ANSYS Fluent, где численно решалась стационарная система из уравнений непрерывности и баланса импульса. Решалась осесимметричная задача с использованием неявной схемы интегрирования, со вторым порядком аппроксимации. В расчет была включена модель турбулентности $k-\varepsilon$ Realizable [10]. При решении задачи были установлены следующие граничные условия:

- давление на входе сопла 10 атм (1 МПа);
- давление на выходе сопла 1 Па;
- температура на входе и выходе сопла ... 300 К;
- стенки считались без скольжения и без шероховатостей.

Выбор методики расчета был основан на следующих соображениях. Оценка числа Кнудсена при заданных параметрах задачи дает значения, не превышающие $2 \cdot 10^{-3}$ внутри сопла и $3 \cdot 10^{-2}$ на расстоянии 5 см от сопла, что позволяет применять с разумной точностью континуальный подход для данной задачи на не слишком больших расстояниях от среза сопла. Конструкция клапана предполагает его размещение в непосредственной близости от плазмы, на расстоянии не более 10 см от последней замкнутой магнитной поверхности установки, что позволяет ожидать высокую степень достоверности полученных расчетных результатов.

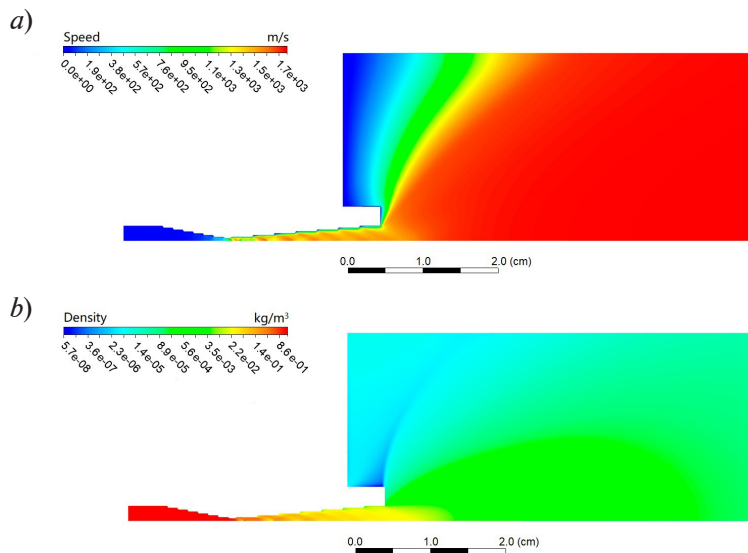


Рис. 3. Расчетные распределения скорости (a) и плотности (b) гелиевой струи при стационарном истечении из ступенчатого сопла с седлом

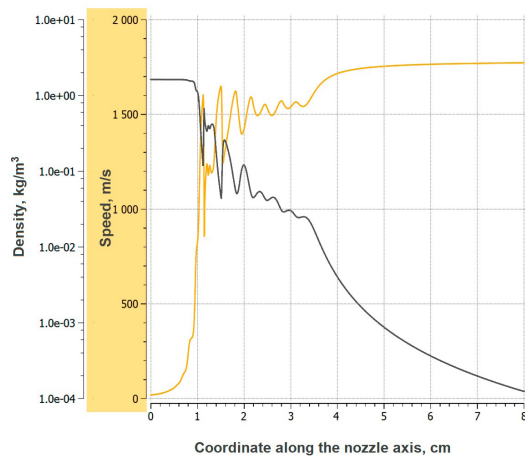


Рис. 4. Распределение скорости (кривая желтого цвета) и плотности (кривая черного цвета) струи вдоль оси инъекции для ступенчатого сопла с седлом

На рис. 3 представлены расчетные распределения скорости и плотности для ступенчатого прототипа сопла Лавала после установления стационарного течения. Внутри сверхзвуковой части сопла можно заметить периодические скачки параметров газа, возникающие в результате отражения ударных волн от ступенек внутри сопла. Такой характер истечения газа может приводить к турбулентному режиму течения газа внутри сопла и сказываться на его производительности.

Логично предположить, что увеличение количества ступенек в профиле сопла вызовет уменьшение амплитуды данных скачков и, соответственно, установление более равномерного характера течения газа внутри сопла. Риск перехода в турбулентный режим течения газа в таком случае будет снижен. Следует отметить, что на выходе сопла с таким профилем из 7 ступенек получается струя с равномерными выходными профилями скорости и плотности потока газа, а расходимость струи – не велика.

Распределения скорости и плотности вдоль оси инжекции струи показаны на рис. 4. На них можно отчетливее наблюдать характер скачков параметров потока вдоль оси инжекции внутри сопла. Амплитуда колебаний по плотности не превышает 80 % от максимального значения, а по скорости потока она составляет около 40 %. Максимальные колебания локализованы вблизи критического сечения сверхзвуковой части сопла. По мере приближения к выходу сопла амплитуда колебаний снижается.

Несмотря на особенности распределений параметров течения газа внутри ступенчатого сопла, общая картина распределения параметров струи за соплом остается такой же, как у обычного конического сопла, за исключением несколько большего угла разлета газа. Скорость непосредственно на выходе сопла уменьшается примерно до 1,5 км/с, но струя в диагностической камере разгоняется до значений скорости $v_{\max} = 1,7$ км/с, что близко к теоретически максимальному (см. равенства (8)). Давление на выходном срезе сопла при заданных параметрах задачи составляет величину порядка 800 Па, что приводит к существенно недорасширенному режиму истечения струи [11]. Характерные размеры висячего скачка уплотнения, полученные из эмпирических формул [12], составляют около 10 см и сопоставимы с размерами диагностической камеры, что вполне соответствует расчетной картине истечения. Исследования крупномасштабной структуры струи лежат за рамками данной работы. Результаты расчетов для сопел с другими профилями, в том числе и гладкого конического, приводятся в следующем разделе работы.

Оптимизация профиля сопла

Коническая форма сопла является предельной для сопла со ступенчатым профилем, при увеличении количества ступенек до бесконечности. Параболическое сопло теоретически должно давать оптимальные значения скорости и угла разлета газа на выходе [7]. Расчетная сетка для параболического сопла строилась следующим образом: размеры входного, выходного и критического сечения полагались такими же, как и при проектировании конического сопла (для сохранения массового расхода), а формы профилей дозвуковой и сверхзвуковой частей имели вид параболы вдоль оси сопла. В области критического сечения производилось «сшивание» формы профилей дозвуковой и сверхзвуковой частей, с помощью метода устремления к нулю первой производной формы профиля сопла вдоль его оси. В ином случае образуется излом профиля сопла, что может приводить к возникновению ударных волн в этой его области.

Для сравнения угла разлета для трех видов сопла оценивалась полуширина струи. Рассчитывалось распределение плотности струи в плоскости, поперечной оси инжекции струи, на расстоянии 3 см от выходного среза сопла. Далее определялось расстояние от оси инжекции, на котором плотность газа падает вдвое относительно своего максимального значения, что и определяет полуширину струи, характеризующую масштаб разлета газа на выходе сопла.

Распределения плотности вдоль поперечного сечения струи для трех видов сопла, для которых проводились расчеты, приведены на рис. 5, а основные характеристики струи в диагностической камере приведены в таблице. Полученные результаты указывают на наименьший разлет гелиевой струи и наибольшую ее скорость на выходе для гладкого конического сопла. Параболическая форма сечения сопла дает промежуточные значения скорости и ширины, что, по-видимому, связано с неоптимальным выбором профиля такого вида сопла при заданных значениях сечений.



Подбор оптимального профиля сопла с параболическим сечением представляет собой сложную вариативную задачу, решение которой выходит за рамки данного исследования. Ступенчатое сопло дает менее, чем 10%-е снижение скорости струи на выходе и приводит к увеличению угла разлета струи примерно вдвое, по сравнению с коническим профилем сопла. Такое ухудшение параметров струи допустимо и вполне компенсируется технологической простотой его изготовления.

Анализ рис. 5 позволяет заключить, что распределения плотности струи в поперечном сечении – монотонные, с максимумами на оси инжекции для всех типов сопла. Абсолютное значение плотности на оси инжекции для ступенчатого сопла падает в 4 раза относительно конического. Заметно также существенное увеличение угла разлета струи для случая ступенчатого сопла.

В ходе моделирования было также проведено варьирование диаметра критического сечения для ступенчатого сопла с целью оценки влияния точности изготовления сопла на параметры формируемой струи. Расчетная сетка соответствовала представленной на рис. 2, с точностью до диаметра критического сечения, который задавался равным $\pm 0,2$ мм от расчетного оптимального значения 0,7 мм (получено по формуле (4)). В результате были рассчитаны распределения скорости и плотности газа на выходе из сопла. Основные параметры струи сведены в ту же самую таблицу.

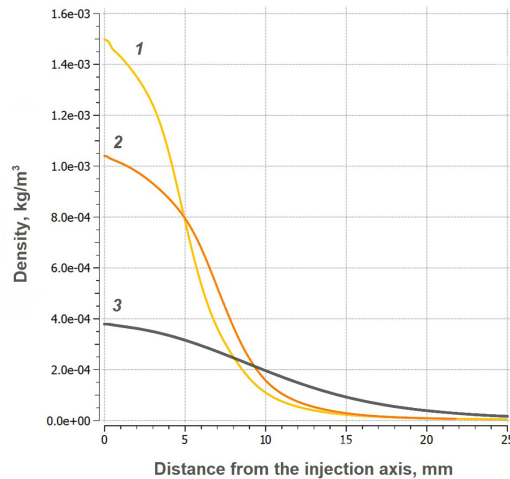


Рис. 5. Распределения плотности гелиевой струи вдоль ее поперечного сечения для трех видов сопла на расстоянии 3 см от среза выходного сечения.

Расчет проведен для конической (кривая 1), параболической (2) и ступенчатой (3) форм сечения сопла

Таблица

Расчитанные значения ключевых параметров работы сопла

Вид сопла	Скорость струи на выходе, м/с	Полуширина струи, мм	Массовый поток, г/с
Коническое	1715	5,0	0,32
Параболическое	1666	7,0	0,32
Ступенчатое.....обычное	1551	10,3	0,32
.....с седлом	1549	11,0	0,32
...с увеличенным до 0,9 мм критическим сечением	1551	10,6	0,55
...с уменьшенным до 0,5 мм	1531	10,9	0,17

Таким образом, при увеличении диаметра критического сечения до 0,9 мм было получено повышение массового расхода газа в 1,7 раза. При уменьшении этого диаметра до 0,5 мм массовый расход снизился в 1,9 раза. Также расчеты показывают, что скорость струи в диагностической камере несущественно зависит от типа сопла, в то время как наименьший угол разлета струи получен для обычного ступенчатого сопла. Падение скорости на выходе сопла и уширение профиля струи в случае варьирования площади критического сечения не превышают нескольких процентов. Однако значительное изменение массового расхода газа при варьировании площади критического сечения указывает на необходимость соблюдения высокой точности размеров при изготовлении профиля ступенчатого сопла (допуск по диаметру должен быть не хуже 0,01 мм).

Заключение

В работе были рассчитаны оптимальные параметры сверхзвукового сопла для заданного массового расхода гелия $3,8 \cdot 10^{-4}$ кг/с. Диаметры входного и выходного сечений составили 4 мм, диаметр критического сечения – 0,7 мм, значения длины дозвуковой и сверхзвуковой частей сопла составили 10 и 20 мм, соответственно; полный угол раствора стенок для дозвуковой части составил 26° , для сверхзвуковой – 12° . Было промоделировано истечение газа через сопла различного профиля в диагностическую камеру с помощью CFD-пакета среды ANSYS Fluent. Были детально рассчитаны параметры потока газа через ступенчатое сопло с седлом в ближнем поле струи. Было установлено, что такое сопло позволяет получать скорость потока газа около 1550 м/с на оси инжекции, с полушириной разлета струи 11 мм на расстоянии 3 см от выходного среза сопла.

Моделирование подтвердило, что ступенчатое сопло с седлом дает несущественную разницу в значениях скорости и полуширины струи, по сравнению с соплом без седла. При заданных значениях сечений максимальную скорость на выходе и минимальный угол разлета струи можно достичь у сопла с конической формой профиля, ступенчатое же сопло с седлом показывает снижение качества не более 10 % по параметру скорости струи на выходе, а по параметру полуширины струи – снижение примерно в 3 раза, что вполне приемлемо, если учитывать технологическую простоту его изготовления.

Таким образом, оптимальным вариантом следует считать проектирование и изготовление ступенчатого сопла с седлом для его использования в первых экспериментах с прототипом клапана МГИ на установках с магнитным удержанием плазмы.

В ходе моделирования было предпринято варьирование площади критического сечения ступенчатого сопла с седлом. Результаты расчетов показали сильную зависимость массового расхода от критического сечения сопла; при этом скорость и полуширина струи на выходе изменялись незначительно.

В целом, проведенное исследование указывает на высокие требования к точности изготовления профилей сопел. Допуски диаметров профиля сопла должны задаваться с точностью не хуже качества 10.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eidietis N. W. Prospects for disruption handling in a tokamak-based fusion reactor // Fusion Science and Technology. 2021. Vol. 77. No. 7–8. Pp. 738–744.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. В 10 тт. Т. 6. Гидродинамика (§ 97. Истечение газа через сопло). М.: Физматлит, 2021. 728 с.
3. Hollmann E. M., Aleynikov P. V., Fülöp T., et al. Status of research toward the ITER disruption mitigation system // Physics of Plasmas. 2015. Vol. 22. No. 2. P. 021802.
4. Дремин М. М., Капралов В. Г., Кислов А. Я. и др. Влияние напуска благородных газов на срыв разряда в токамаке Т-10 // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Серия «Термоядерный синтез». 2012. № 4. С. 58–70.
5. Дулов В. Г., Лукьянов Г. А. Газодинамика процессов истечения. Новосибирск: Наука, 1984. 226 с.
6. Изотов Б. А. Расчет и построение профиля сопла Лавала. Оренбург: Изд-во Государственного Оренбургского университета, 2009. 20 с.

7. Кириллов А. В., Ротинян Е. М. Механика жидкости и газа. Сопло Лаваля. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2017. 22 с.
8. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. Конструирование и расчет вакуумных систем. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1979. 504 с.
9. Шишков А. А., Панин С. Д., Румянцев Б. В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: Справочник. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
10. Shih T. H., Liou W. W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J. A new k - ε eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows // Computers & Fluids. 1995. Vol. 24. No. 3. Pp. 227–238.
11. Волков К. Н., Емельянов В. Н., Зазимко В. А. Турбулентные струи: статические модели и моделирование крупных вихрей. М.: Физматлит, 2014. 360 с.
12. Шелухин Н. Н. Исследование характеристик сверхзвуковой недорасширенной струи // Ученые записки ЦАГИ (Центральный аэрогидродинамический институт). 1995. Т. 26. № 1–2. С. 78–87.

REFERENCES

1. Eidielis N. W., Prospects for disruption handling in a tokamak-based fusion reactor, Fusion Sci. Technol. 77 (7–8) (2021) 738–744.
2. Landau L. D., Lifshitz E. M., Fluid mechanics (§ 97. Flow of gas through a nozzle), Second Ed. Vol. 6 of Course of Theoretical Physics. Pergamon Press, Oxford, New York, 1987.
3. Hollmann E. M., Aleynikov P. B., Fülöp T., et al., Status of research toward the ITER disruption mitigation system, Phys. Plasmas. 22 (2) (2015) 021802.
4. Dremine M. M., Kapralov V. G., Kislov A. Ya., et al., Effect of noble gas injection on discharge disruption in T-10 tokamak, Probl. At. Sci. Technol. Ser. “Thermonucl. Fusion” (4) (2012) 58–70 (in Russian).
5. Dulov V. G., Lukyanov G. A., Gazodinamika protsessov istryecheniya [Gas dynamics of outflow processes], Nauka, Novosibirsk, 1984 (in Russian).
6. Izotov B. A., Raschet i postroyeniye profilya sopla Lavalya [Calculation and profiling of De Laval nozzle], Orenburg State University Publishing, Orenburg, 2009 (in Russian).
7. Kirillov A. B., Rotinyan E. M., Mekhanika zhidkosti i gaza. Soplo Lavalya [Fluid-flow mechanics. De Laval nozzle], Polytechnical Institute Publishing, St. Petersburg, 2017 (in Russian).
8. Pipko A. I., Pliskovskii V. Ya., Penchko E. A., Konstruirovaniye i raschet vakuumnykh system [Design and calculation of vacuum systems], Energiya, Moscow, 1979 (in Russian).
9. Shishkov A. A., Panin S. D., Rummyantsev B. V., Rabochiye protsessy v raketnykh dvigatelyakh tverdogo topliva: Spravochnik [Operation processes in solid rocket motors: Handbook], Mashinostroyeniye, Moscow, 1988 (in Russian).
10. Shih T. H., Liou W. W., Shabbir A., et al., A new k - ε eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows, Comput. Fluids. 24 (3) (1995) 227–238.
11. Volkov K. N., Emelyanov V. N., Zazimko V. A., Turbulentnyye strui: staticheskiye modeli i modelirovaniye krupnykh vikhrey [Turbulent jet flows: Statistical models and simulation of large vortices], Fizmatlit, Moscow, 2014. (in Russian).
12. Shelukhin N. N., Issledovaniye kharakteristik sverkhzvukovoy nedorasshirennoy strui [Study of characteristics of a supersonic underexpanded jet flow], TsAGI Sci. J. 26 (1–2) (1995) 78–87 (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТИМОХИН Владимир Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

v.timokhin@spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-4700-6122

КОРОБКО Дмитрий Дмитриевич – студент Института электроники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

korobko.dd@edu.spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-8559-3209

НУРТДИНОВА Линара Ильфатовна – студентка Института электроники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

nurtdinova.li@edu.spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-1029-2049

КАПРАЛОВ Владимир Геннадиевич – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

kapralov15@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1091-6405

СЕРГЕЕВ Владимир Юрьевич – доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

V.Sergeev@spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-4572-4120

THE AUTHORS

TIMOKHIN Vladimir M.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

v.timokhin@spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-4700-6122

KOROBKO Dmitriy D.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

korobko.dd@edu.spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-8559-3209

NURTDINOVA Linara I.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

nurtdinova.li@edu.spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-1029-2049

KAPRALOV Vladimir G.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

kapralov15@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1091-6405



SERGEEV Vladimir Yu.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

V.Sergeev@spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-4572-4120

*Статья поступила в редакцию 05.09.2023. Одобрена после рецензирования 04.10.2023.
Принята 04.10.2023.*

Received 05.09.2023. Approved after reviewing 04.10.2023. Accepted 04.10.2023.