

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВХОДНОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ

© 2025 г. В. С. Чернышев^{а,*}, К. М. Гуторов^а, В. Л. Подковыров^а, А. А. Мамонов^а

^а ГНЦ РФ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”,
Троицк, Москва, Россия

*e-mail: chernyshev.valentin@triniti.ru

Поступила в редакцию 25.11.2024 г.

После доработки 13.01.2025 г.

Принята к публикации 15.01.2025 г.

В АО “ГНЦ РФ ТРИНИТИ” в рамках федерального проекта “Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий” ведутся работы по созданию прототипа плазменного ракетного двигателя на основе двухступенчатого квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя с разделением процессов предварительной ионизации рабочего тела и окончательного формирования высокоскоростного потока. Определены разрядные характеристики входной ионизационной камеры при использовании водорода и гелия в качестве рабочего газа в актуальной области расхода 1.5–3 мг за импульс, на основе которых установлены рекомендуемые значения удельного энерговклада в диапазоне 2.2–2.6 кДж/мг для H₂ и 1.2–1.6 кДж/мг для He. Оценка температуры плазмы для водорода на уровне 0.8 эВ согласуется с измеренной скоростью плазменного потока 16 ± 3 км/с. Коэффициент преобразования вложенной электрической энергии в энергию плазменного потока составил 65% во всем исследованном диапазоне. Полученные результаты позволяют прогнозировать электроразрядные характеристики, потребности в охлаждении и скорость эрозии для первой ступени плазменного ракетного двигателя.

Ключевые слова: квазистационарный сильноточный плазменный ускоритель, плазменный ракетный двигатель

DOI: 10.31857/S0367292125010057, EDN: DWPHYG

1. ВВЕДЕНИЕ

В АО “ГНЦ РФ ТРИНИТИ” в рамках реализации федерального проекта “Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий” ФП-3 комплексной программы “Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года” [1] ведутся работы по созданию прототипа плазменного ракетного двигателя на основе квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя (КСПУ). Реализуется концепция двухступенчатого КСПУ с разделением процессов предварительной ионизации рабочего тела и окончательного формирования высокоскоростного потока. Основные принципы таких установок были разработаны А. И. Морозовым [2, 3], одной из их отличительных черт является наличие первой ионизирующей ступени — входного иони-

зационного блока, обычно состоящего из нескольких входных ионизационных камер (ВИК). Основная функция ВИК — полная ионизация инжектируемого газа и регулирование параметров плазмы на входе ускорительной ступени КСПУ. Численное моделирование ускорительного канала демонстрирует важность правильной подачи плазмы на вход [4–7] для избегания таких проблем, как нестационарность разряда [4, 5], неустойчивость ионизации [5, 6], неравномерность распределения тока на электродах, вплоть до появления токов обратного направления (токовых вихрей) [7]. Необходимо отметить отсутствие работ по сквозному моделированию сразу двух ступеней ускорителя. Известен подход с отдельным расчетом течения в ВИК и последующим использованием этих результатов как входных условий для ускорительной ступени [7]. Применение предварительной ионизации при создании прототипа плазменного ракетного двигателя позволяет разделить процессы иони-

зации и ускорения для их независимой оптимизации, что должно способствовать повышению эффективности двигателя и увеличению ресурса электродов. Использование водорода в качестве рабочего тела оправдано высокой энергетической эффективностью работы КСПУ на легких газах и целевым удельным импульсом в 100 км/с, при котором кинетическая энергия протона составляет 52 эВ, что не ниже 70% общей уносимой потоком энергии в пересчете на один ион.

Двухступенчатые КСПУ широко исследовались экспериментально в конце 80-х и начале 90-х годов прошлого века в рамках кооперации под руководством А. И. Морозова в филиале Курчатовского института (сейчас ТРИНИТИ) [8], ХФТИ (г. Харьков) [9–11], МАИ [12], МВТУ им. Н.Э. Баумана [13] и Институте молекулярной и атомной физики (г. Минск) [14]. В последующем двухступенчатая система активно исследовалась только в ХФТИ [11]. С помощью подобных двухступенчатых конфигураций были достигнуты высокие плотности плазмы (10^{21} – 10^{22} м⁻³) и скорости выходного потока (10^4 – 10^5 м/с). В работе [10] представлены первые результаты эксплуатации подобных установок. В качестве обострителя мощности использовался индуктивный накопитель, а ВИК в количестве 6 штук применялись для обеспечения необходимой симметрии и параметров потока плазмы на входе в ускорительный канал. В ХФТИ [11] в то же время проводились исследования с похожей двухступенчатой установкой с четырьмя ВИК для ионизации газа и генерации плазменного потока со скоростью, обеспечивающей согласование работы двух ступеней ускорителя без нарушения регулярности течения плазмы. Были получены зависимости скорости от разрядного тока и массового расхода. Максимальная скорость, измеренная по времяпролетному методу, достигала $7 \cdot 10^4$ м/с. При этом существовали режимы работы, в которых отсутствовал приэлектродный скачок потенциала. Данные по эрозии электродов ВИК приводятся в работе [10], где отмечается ее присутствие только при разрядном токе выше 60 кА.

Целенаправленного и подробного исследования работы ВИК, позволяющего выбрать режим

работы системы предварительной ионизации нового ускорителя, не было представлено ни в одном из литературных источников. Данные для анализа с различных установок требовалось приводить к единым анализируемым величинам. Актуальным значением для текущей работы по созданию прототипа плазменного ракетного двигателя является суммарный расход газа 6 мг при длительности токового импульса порядка 2 мс, что при использовании 4 ВИК в первой ступени дает значение мгновенного расхода 0.75 г/с в расчете на один ВИК. Минимальное значение удельного энерговклада в разряд можно принять за 1.3 кДж/мг, исходя из потенциала ионизации водорода, составляющего 13.6 эВ. В табл. 1 приведены характерные значения для первой ступени ускорителя, полученные на основе представленных в литературе экспериментальных данных: величина удельного энерговклада была “восстановлена” по имеющимся разрядным характеристикам (зависимостям тока и напряжения разряда), а мгновенный расход газа — по суммарному расходу и длительности импульса.

Из приведенных данных видно, что все работы проводились с существенно превышающими актуальные требования мгновенными расходами, а полная ионизация рабочего тела (водород) могла быть достигнута только в узких диапазонах экспериментальных условий. В этой связи необходимы исследования ВИК с требуемым мгновенным расходом рабочего тела и достижением достаточного для полной ионизации энерговклада. Данная работа посвящена исследованию режимов работы входной ионизационной камеры двухступенчатого квазистационарного плазменного ускорителя при использовании водорода и гелия в качестве рабочего газа с целью выявить условия полной ионизации рабочего тела, определить эффективность энерговклада в разряд и его верхнюю границу, обуславливаемую эрозией электродной системы.

2. ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Конструкция исследуемой ВИК представляет собой коаксиальную электродную систему со стальным анодом диаметром 7 см и профилированным медным катодом с максимальным диаметром 5 см. Для подачи рабочего тела

Таблица 1. Характерные значения удельного энерговклада в разряд ВИК для водорода

Установка	Удельный энерговклад, кДж/мг	Расход газа, мг	Длительность импульса, мс	Мгновенный расход газа, г/с
КСПУ-П50 [8]	0.24	30.0	1.00	30.00
КСПУ-Х50 [9]	0.39–3.50	0.75	0.25	3.00
	0.04–0.57	5.00	0.25	20.00
КСПУ-Х50 [10]	0.07–3.07	0.45	0.24	1.88
	0.02–0.92	1.35	0.24	5.63

в межэлектродное пространство используется импульсный электромагнитный клапан. Питание разряда осуществляется от конденсаторной батареи емкостью 16 мФ с максимальным напряжением 5 кВ, заряжаемой в экспериментах с ВИК не выше 2.4 кВ. В цепь питания последовательно включена индуктивность 6 мкГн для согласования формы токового импульса с формой газового импульса. Такая схема питания позволяет регулировать амплитуду тока в цепи разряда за счет изменения напряжения зарядки батареи. Остаточное давление в вакуумной камере составляет порядка 0.013 Па, общий объем камеры 6.5 м³. На рис. 1 представлена схема эксперимента с ВИК (электродная система выделена коричневым цветом) с указанием расположения ключевых диагностик.

Ток разряда и ток выноса измеряются с помощью поясов Роговского (соответственно правый и левый пояса на рис. 1), напряжение раз-

ряда измеряется с помощью резистивного делителя. Полная энергия, вынесенная плазменным потоком, измеряется с помощью медного калориметра [15]. Сбор света для спектральных диагностик производится посредством коллиматоров, установленных перпендикулярно направлению движения потока и вслед под углом 49.6°, как показано на рис. 1. Регистрируются обзорные спектры в выбранные промежутки времени разряда с длительностью накопления 11 мкс, а также ведется высокоскоростная регистрация линии H_{α} для определения скорости потока по доплеровскому сдвигу [16]. Визуальное наблюдение потока проводится с помощью высокоскоростной камеры Phantom 2512 с длительностью экспозиции кадра 1 мкс и типичной скоростью съемки 62 000 кадров/с. На рис. 2 представлен кадр, иллюстрирующий плазменный поток, выходящий из электродной системы и попадающий в калориметр.

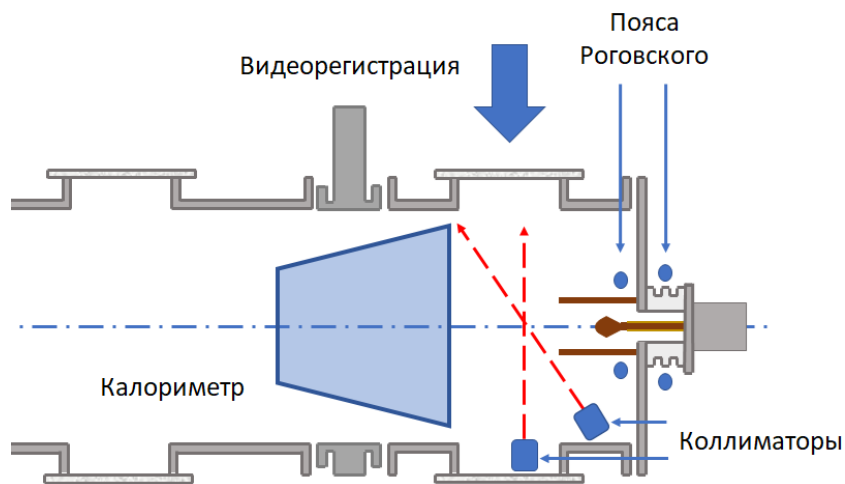


Рис. 1. Схема проведения экспериментов с входной ионизационной камерой.

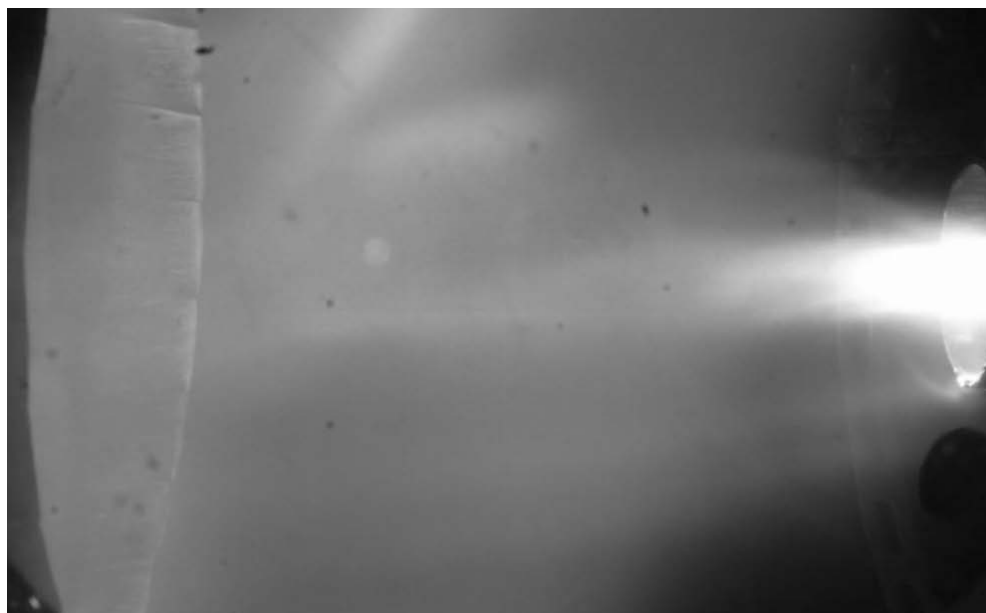


Рис. 2. Кадр с изображением плазменного потока, попадающего в калориметр.

Каждая серия экспериментов предваряется настройкой клапана для обеспечения необходимого расхода для каждого сорта газа. Мгновенный расход газа при срабатывании клапана определяется по значению динамического давления потока, измеряемого датчиком PIEZOTRONICS I13B28 в критическом сечении (наиболее узком месте электродной системы). Характерная зависимость давления от времени представлена на рис. 3 совместно с аналогичной зависимостью тока разряда, что иллюстрирует согласованность протекания тока с подачей газа в разряд. Полная длительность импульса близка к 2 мс. Интегральный массовый расход газа за импульс определяется в каждом пуске, исходя из перепада давления до и после пуска в отсекаемом от подающей линии буферном объеме перед клапаном.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследования проведены для двух плазмообразующих газов: H_2 и He. Расход газа варьировался в диапазоне от 1 до 4 мг. Диапазон варьирования напряжения на конденсаторной батарее питания разряда: 0.8–2.4 кВ.

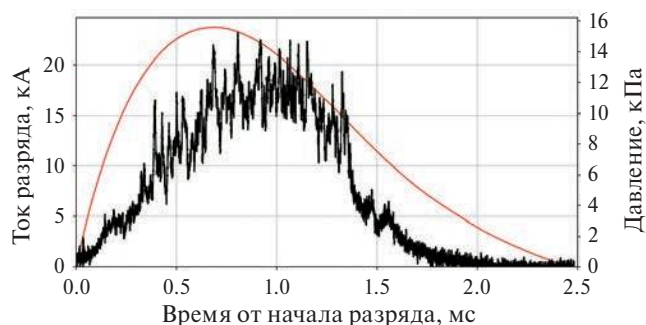


Рис. 3. Согласование профилей разрядного тока и динамического давления газа для водорода (для гелия зависимость имеет похожий вид).

Характерные профили разрядного тока и напряжения ВИК для водорода представлены на рис. 4, для гелия наблюдаются аналогичные характерные временные зависимости. Профиль тока определяется ёмкостью батареи и индуктивностью цепи питания. Профиль напряжения отражает параметры плазмы в разрядном промежутке при заданном токе. График эффективного сопротивления (отношение напряжения к току разряда) позволяет продемонстрировать квазистационарную фазу разряда — участок, где сопротивление можно считать постоянным. Видно, что большая часть разряда относится именно к квазистационарной фазе, а переходные процессы на старте и окончании занимают меньшую часть по длительности и, что важнее, по вложенной в это время энергии. Далее при построении зависимостей для всех величин (ток, напряжение, сопротивление) берутся значения в момент времени, соответствующий максимуму тока. Ток выноса — это ток, текущий между катодом и стенками вакуумной камеры вне основного разрядного промежутка и измеряемый поясом Роговского, размещённым вокруг анода. Ток выноса напрямую не вносит вклад в процессы ионизации и нагрева, происходящие в разрядном промежутке, поэтому при построении токовых зависимостей и при оценке напряжения на разряде учитывалась только протекающая в электродной системе часть разрядного тока (полный ток за вычетом тока выноса).

Вольт-амперные характеристики разряда приведены на рис. 5. Результаты получены в диапазоне тока от 5 до 35 кА, соответствующие значения напряжения разряда составили от 100 до 300 В. Относительная погрешность при измерении тока 2% (погрешность калировки пояса Роговского) и 9% при измерении напряжения (определяется погрешностью выбора значения напряжения в максимуму

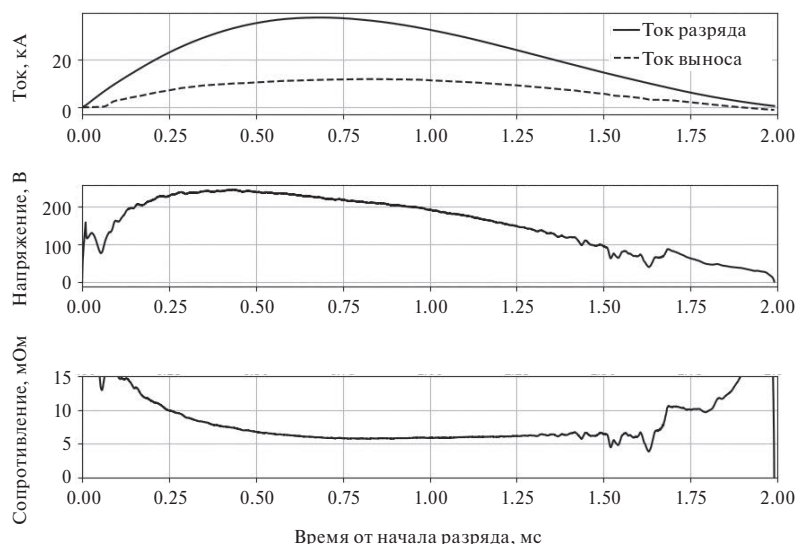


Рис. 4. Характерные временные зависимости тока разряда и тока выноса, напряжения и сопротивления разряда для водорода.

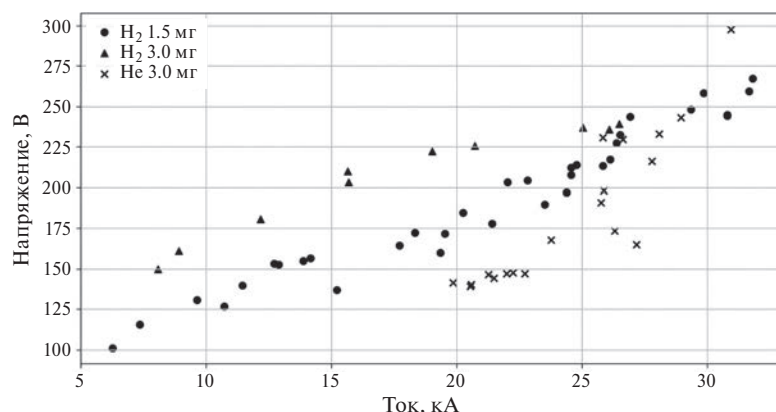


Рис. 5. Вольтамперные характеристики разряда для газов H_2 и He при расходах 1.5 и 3.0 мг.

ме тока). Линии зависимостей напряжения от тока для двух газов и двух расходов в области максимальных токов 25–35 кА приходят к единой прямой (рис. 5). Представленные результаты качественно согласуются с данными работы [17] в части того, что ВАХ более тяжелого газа лежит ниже, чем более легкого (в источнике H_2 и N_2) в диапазоне токов от 20 до 50 кА и расходах газа порядка 1.5 г/с. Для двух представленных значений расхода и представленного диапазона токов не наблюдался резкий рост напряжения разряда при увеличении тока, аналогичный литературным данным [17].

Для приведения результатов с разными массовыми расходами к единому параметру сравнения построена зависимость напряжения разряда от удельного энерговклада (рис. 6). Удельный энерговклад рассчитывается как отношение полной вложенной в разряд энергии Q_d к полному расходу газа в пуске. Q_d определяется интегрированием по произведению осциллограмм тока разряда I_d и напряжения разряда U_d

$$Q_d = \int_0^{\Delta t} I_d(t) U_d(t) dt, \quad (1)$$

где Δt — длительность разрядного импульса. Относительная погрешность при определении энерговклада составляла 3%.

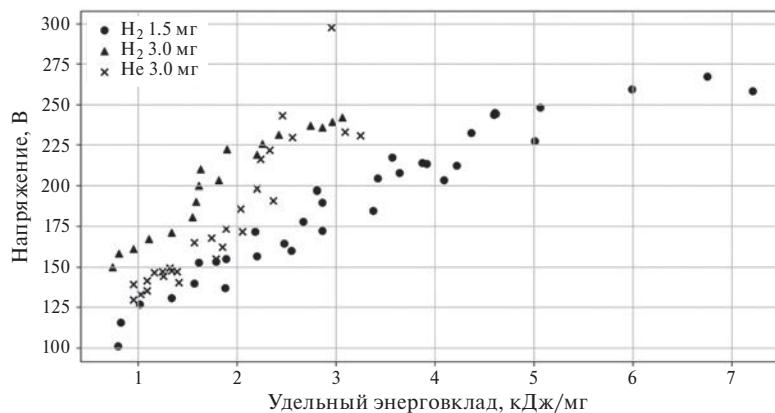


Рис. 6. Зависимость напряжения разряда от удельного энерговклада для газов H_2 и He при расходах 1.5 и 3.0 мг.

Наиболее универсальной представляется зависимость сопротивления разряда от удельного энерговклада (рис. 7). Можно задаться минимальной энергией, необходимой для ионизации газа исходя из потенциала ионизации без учета КПД: 1.3 кДж/мг для H_2 и 0.59 кДж/мг для He. На рис. 7 прослеживаются участки снижения сопротивления при росте энерговклада и определяются моменты достижения минимума, соответствующие полной ионизации газа: 2.2–2.6 кДж/мг для H_2 и 1.2–1.6 кДж/мг для He. Для He наблюдается участок роста сопротивления, что связывается с увеличением скорости потока. Существенным является и факт независимости сопротивления от сорта газа и расхода при удельном энерговкладе выше 2.2 кДж/мг. Предполагается, что это может быть связано с эрозией электродов, приводящей к поступлению тяжелых частиц в плазму, что мешает дальнейшему росту скорости истечения потока. При полной энергии разряда выше 5 кДж тепловая нагрузка на катод может превышать порог плавления, составляющий для меди 0.7 МДж/м². Локальные следы оплавления действительно наблюдались на катоде. В эксперименте также наблюдалось увеличение интенсивности линий меди при высоком энерговкладе в разряд.

Калориметрия плазменного потока позволяет определить эффективность энергозатрат на создание плазмы. Экспериментально определяется ко-

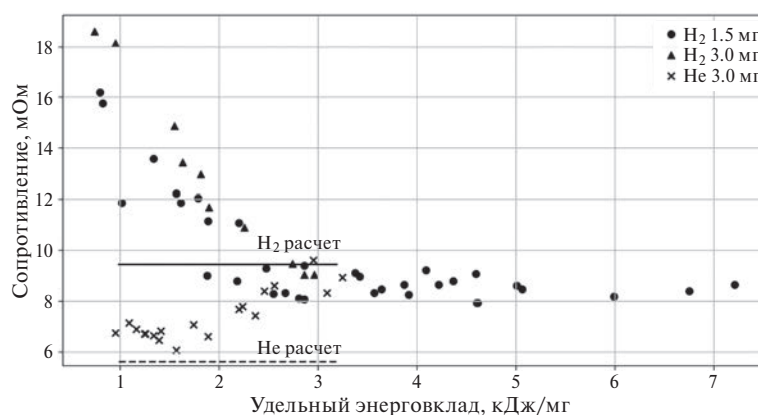


Рис. 7. Зависимость сопротивления разряда от удельного энерговклада для газов H_2 и He при расходах 1.5 и 3.0 мг. Горизонтальными линиями показано расчетное значение согласно “Оценке 2” из табл. 2.

эффицент преобразования энергии — отношение полной энергии, зарегистрированной калориметром, к величине полной вложенной в разряд энергии Q_d . На рис. 8 приведена зависимость коэффициента преобразования энергии от полного энерговклада в разряд для водорода. Погрешность обусловлена неравномерностью остывания термопар (удара плазмы в конус калориметра), а также процедурой программной обработки. Медианное значение коэффициента составляет 0.65, что можно трактовать как энергетическую цену иона водорода на уровне 20 эВ/ион или необходимые затраты на ионизацию на уровне 2 кДж/мг. Указанный результат позволяет определить величину энергии, уходящей на нагрев конструкции ВИК при его ра-

боте, а также рассчитывать потребности в охлаждении.

Обзорный спектр плазменного потока для водорода (рис. 9) демонстрирует преимущественное свечение линий серии Бальмера, из примесей наиболее интенсивно свечение кислорода (неразрешенный триплет $O\ I\ 777.2 / 777.4 / 777.5$ нм на рисунке помечен центральной длиной волны), также можно обнаружить слабые линии меди (материал катода). Увеличение энерговклада в общем случае приводит к росту интенсивности H_β относительно H_α и усилению свечения примесей.

Определение скорости плазменного потока осуществляется по величине доплеровского сдвига спектральной линии H_α при сборе излучения

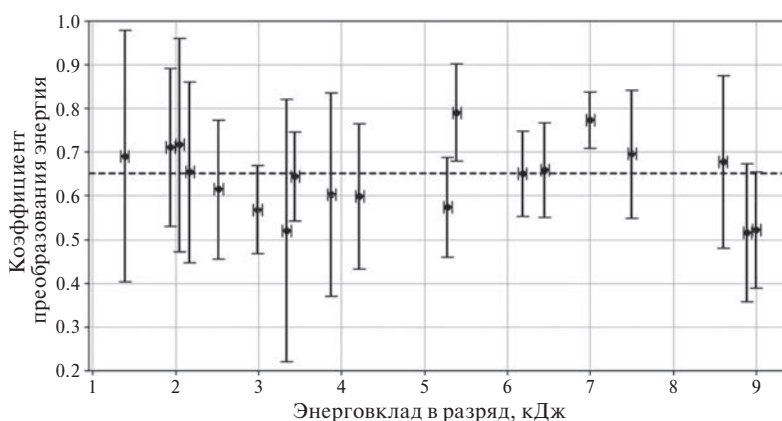


Рис. 8. Зависимость коэффициента преобразования энергии от полного энерговклада в разряд для водорода.

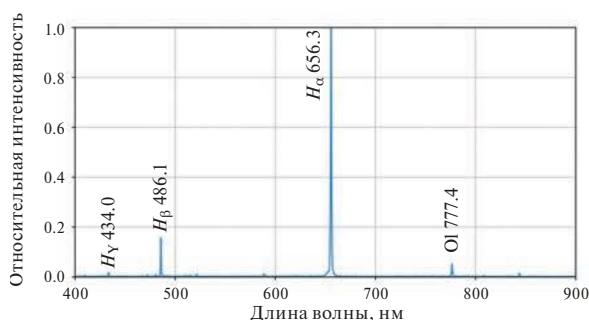


Рис. 9. Обзорный спектр плазменного потока для водорода.

потока коллиматорами, установленными для наблюдения перпендикулярно и вслед убегающему потоку. Подробно методика измерений описана в работе [16]. Характерная временная зависимость скорости для энерговклада выше 2 кДж/мг приведена на рис. 10. Средняя скорость составляет около 16 ± 3 км/с. Погрешность обусловлена точностью определения максимума линии при обработке достаточно широкого контура H_α . Наблюдается провал скорости в момент времени около 1.5 мс от начала разряда, что соответствует снижению мощности разряда примерно в 4 раза от максимальной.

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Напряжение разряда (а также эффективное сопротивление) можно оценить на основе геометрических размеров и параметров плазмы ВИК, используя закон Ома с учетом азимутального магнитного поля \mathbf{B} , радиального тока \mathbf{j} и продольной скорости плазмы \mathbf{u} [18] (рис. 11)

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{j}}{\sigma} - \frac{1}{c}[\mathbf{u} \times \mathbf{B}]. \quad (2)$$

Большая часть тока разряда протекает между электродами в слое плазмы шириной порядка 1 см за наиболее узким местом межэлектродного канала. Для оценки параметров плазмы можно задаться характерными величинами: температуры ионов и электронов равны $T_e = T_i = 1$ эВ, ток разряда $I = 20$ кА, расход водорода 3 мг за импульс, площадь поперечного сечения разрядного канала 30 см^2 . Средняя тепловая скорость ионов при этом составит $1.56 \cdot 10^4$ м/с, скорость электронов $6.7 \cdot 10^5$ м/с. Концентрация плазмы при вылете ионов со средней тепловой скоростью $n = 7.56 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Радиус Дебая $r_D = 2.7 \cdot 10^{-8}$ м. Длина и время кулоновского рассеяния электронов на ионах: $\lambda_{ei} = 1.14 \cdot 10^{-6}$ м, $t_{ei} = 1.9 \cdot 10^{-12}$ с. При столь малой длине пробега электрона справедливо предположение о равенстве электронной и ионной компонент температуры ($T_e = T_i$). Омическое сопротивление слоя плазмы 3.7 мОм, а со-

ответствующая омическая составляющая напряжения $U_r = 75$ В.

Движение плазмы в магнитном поле, генерируемом при протекании тока по электродам, приводит к разнонаправленному смещению ионов и электронов, увеличивающему напряжение между электродами. Индукция магнитного поля у катода $B_c = I/(2\pi r_c) = 0.25$ Тл, где r — радиус катода. При движении водородной плазмы со скоростью 15.6 км/с лоренцевская составляющая напряжения равна $U_{Lor} = 74$ В. Оценки параметра Холла для электронов и ионов дают $\chi_e = 0.15$ и $\chi_i = 8 \cdot 10^{-5}$ соответственно, что говорит об отсутствии замагниченности как для ионов, так и для электронов. Замагниченность электронов будет возможна при уменьшении плотности плазмы, например, при увеличении габаритов установки или использовании более тяжелого плазмообразующего газа.

Результаты оценки параметров разряда в H_2 и He для двух значений температуры плазмы, а также соответствующие экспериментальные результаты приведены в табл. 2. Выбраны два близких значения разрядного тока (26.5 кА для H_2 и 27.5 кА для He), соответствующие минимальным значениям эффективного сопротивления разряда. Для расчета омической составляющей напряжения U_r использована протекающая в электродной системе часть разрядного тока (полный ток за вычетом тока выноса), в расчете магнитного поля использован полный ток. “Оценка 1” выполнена для значения температуры, при которой должна достигаться полная ионизации в предположении термодинамического равновесия (т. е. в предположении применимости формулы Саха). Составляющая омического напряжения при этом оказывается больше лоренцевской составляющей, а полное эффективное сопротивление оказывается завышено в сравнении с экспериментальными данными. “Оценка 2” выполнена для значения температуры, подобранного для достижения равенства двух компонент напряжения, что должно соответствовать минимальному эффективному сопротивлению, которое оказывается близким по величине к экспериментальным

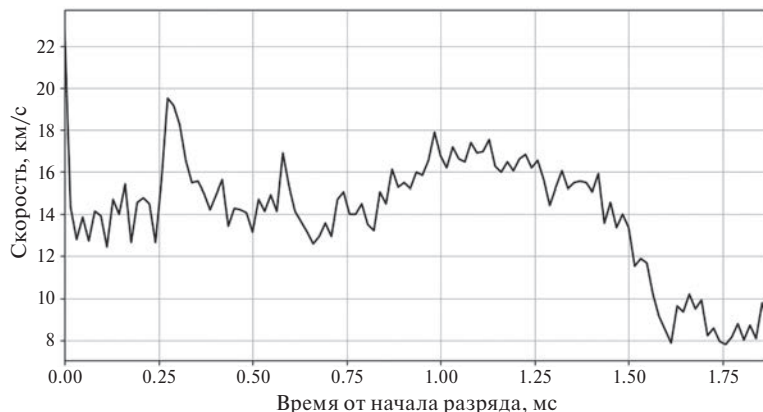


Рис. 10. Временная зависимость скорости плазменного потока.

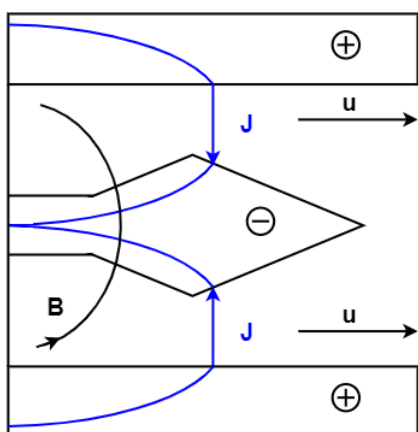


Рис. 11. Иллюстрация разряда в ВИК.

данным. Именно эти значения показаны линиями для расчетного сопротивления на рис. 7. Результаты измерения скорости потока также свидетельствуют о температуре плазмы, близкой к 1 эВ.

Баланс величин омической и лоренцевской составляющих напряжения сильно зависит от температуры плазмы. При низкой температуре омическая составляющая напряжения оказывается сильно больше лоренцевской, однако с ее ростом при росте энергозклада эта разница существенно снижается, поскольку $U_{Lor} \sim \sqrt{T}$, а $U_r \sim T^{-3/2}$. При достаточно высокой температуре или высокой скорости может наблюдаться ситуация, когда омическая составляющая ниже лоренцевской.

Эффективное сопротивление для гелия в рассмотренном диапазоне токов оказывается ниже, чем для водорода. Это обусловлено существенно меньшей скоростью истечения гелия — при той же температуре скорость меньше в 2 раза из-за разницы в массе в 4 раза, что отражается в отставании по величине лоренцевской компоненты $U_{Lor} \sim u_i \sim m_i^{-1/2}$ (95 В — H_2 и 52 В — He). Омическая составляющая, зависящая от массы ионов как $U_r \sim \ln(m_i)$ будет несколько выше по величине для гелия при равенстве температур (81 В — H_2 и 86 В — He). При увеличении массового расхода газа происходит увеличение полного напряжения из-за увеличения омической составляющей. Стоит отметить, что для дугового разряда величину при-

катодного падения потенциала можно оценить, как величину потенциала ионизации соответствующего газа. Таким образом, прикатодное падение потенциала для водорода не превышает 13.6 В, а для гелия — 24.59 В, что увеличивает полное напряжение при работе с гелием.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены разрядные характеристики входной ионизационной камеры двухступенчатого квазистационарного плазменного ускорителя при использовании водорода и гелия в качестве рабочего газа в актуальной для создания прототипа плазменного ракетного двигателя области расхода 1.5–3 мг за импульс. Использование индуктивности в цепи разряда позволило затянуть фронт нарастания тока и согласовать протекание тока разряда с динамикой поступления газа в межэлектродный промежуток.

Анализ поведения эффективного сопротивления разряда в зависимости от удельного энергозклада позволяет выявить характерные области перехода от состояния с преобладанием омической составляющей напряжения к состоянию с преобладанием лоренцевской составляющей. Оценка температуры плазмы в области минимума сопротивления для водорода на уровне 0.8 эВ согласуется с измеренной скоростью плазменного потока 16 ± 3 км/с. Низкое эффективное сопротивление для гелия по сравнению с водородом в области малых энергозкладов объясняется существенно меньшей скоростью истечения, приводящей к малому значению лоренцевской составляющей в напряжении разряда. При энергозкладе выше 2.6 кДж/мг наблюдается постоянство эффективного сопротивления с одним значением как для водорода, так и для гелия, а в спектре излучения разряда растет интенсивность линий примеси. Эти признаки свидетельствуют о поступлении паров материала катода в разряд, чего следует избегать. Представленные результаты позволяют рекомендовать работу ВИК с энергозкладом в диапазоне значений 2.2–2.6 кДж/мг для H_2 и 1.2–1.6 кДж/мг для He.

Данные калориметрии дают значение коэффициента преобразования вложенной электрической энергии в энергию плазменного потока 65%

Таблица 2. Сравнение экспериментальных и расчетных данных для H_2 и He при мгновенном расходе 1.5 г/с

	H_2			He		
	Эксперимент	Оценка 1	Оценка 2	Эксперимент	Оценка 1	Оценка 2
I , А	26.5			27.5		
T , эВ	—	0.21	0.8	—	0.35	1.4
U , В	242	397	249	165	353	154
U_r , В	—	334	125	—	315	77
U_{Lor} , В	—	63	124	—	38	77
R_{eff} , МОм	9.1	15	9.4	6	12.8	5.6

во всем исследованном диапазоне. Полученные результаты позволяют прогнозировать электроразрядные характеристики, потребности в охлаждении и скорость эрозии для первой ступени плазменного ракетного двигателя на основе квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № Н.4к.241.09.23.1062 от 19.04.2023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильгисонис В.И., Ильин К.И., Новиков С.Г., Оленин Ю.А. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 963.
2. Морозов А.И. // УФН. 1990. Т. 160. С. 147.
3. Морозов А.И. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. С. 131.
4. Kozlov A.N. // Phys. Fluids. 2022. V. 34. P. 104109. <https://doi.org/10.1063/5.0117298>
5. Kozlov A.N., Klimov N.S., Kononov V.S., Podkovyrov V.L., Urlova R.V. // J. Phys.: Confer. Ser., 18th Internat. Workshop Magneto-Plasma Aerodynamics. 2019. P. 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1394/1/012021>
6. Брушлинский К.В., Морозов А.И. Вопросы теории плазмы. Вып. 8 / Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Госатомиздат, 1974. С. 88.
7. Брушлинский К.В., Заборов А.М., Козлов А.Н., Морозов А.И., Савельев В.В. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. С. 147.
8. Белан В.Г., Золотарев С.П., Левашов В.Ф., Майнашев В.С., Морозов А.И., Подковыров В.Л., Скворцов Ю.В. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. С. 176.
9. Волошко А.Ю., Гаркуша И.Е., Казаков О.Е., Морозов А.И., Павличенко О.С., Соляков Д.Г., Терешин В.И., Тиаров М.А., Трубочанинов С.А., Царенко А.В., Чеботарев В.В. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. С. 158.
10. Стальцов В.В., Махлай В.А., Чеботарёв В.В., Кулик Н.В. // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 4. С. 73.
11. Гаркуша И.Е., Соляков Д.Г., Чеботарев В.В., Махлай В.А., Кулик Н.В. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 179.
12. Дьяконов Г.А., Тихонов В.Б. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 6. С. 533.
13. Мастюков Е.Н., Мишанов А.В., Хвезюк В.И. // Тезисы докладов VII-ой Всесоюзной конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. Харьков, 1989. С. 45.
14. Ананин С.И., Асташинский В.М., Баканович Г.И., Костюкевич Е.А., Кузьмицкий А.М., Маньковский А.А., Минько Л.Я., Морозов А.И. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. С. 186.
15. Климов Н.С., Коваленко Д.В., Подковыров В.Л., Кочнев Д.М., Ярошевская А.Д., Урлова Р.В., Козлов А.Н., Коновалов В.С. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. С. 52. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2019-42-3-52-63>
16. Yaroshevskaya A.D., Gutorov K.M., Podkovyrov V.L., Litvinenko Yu.I. // Plasma Phys. Rep. 2024. V. 50. P. 689. <https://doi.org/10.1134/S1063780X24600634>
17. Ковров П.Е., Шубин А.П. Физика и применение плазменных ускорителей / Под ред. А.И. Морозова. Минск: Наука и техника, 1974. С. 78.
18. Морозов А.И., Соловьев Л.С. Вопросы теории плазмы. Вып. 8 / Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Госатомиздат, 1974. С. 3.

INVESTIGATION OF THE INPUT IONIZATION CHAMBER OF A TWO-STAGE PLASMA ACCELERATOR

V. S. Chernyshev^{a,*}, K. M. Gutorov^a, V. L. Podkovyrov^a and A. A. Mamonov^a

^a *Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Troitsk, Moscow, 108840 Russia*

^{*} *e-mail: chernyshev.valentin@triniti.ru*

Within the framework of the federal project “Development of controlled fusion technologies and innovative plasma technologies”, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research (TRINITI) is working on the creation of a prototype plasma rocket thruster based on a two-stage quasi-stationary high-current plasma accelerator where the processes of propellant preliminary ionization and final high-speed flow formation are separated. The discharge characteristics of the input ionization chamber were determined when using hydrogen and helium as a propellant in the relevant flow range of 1.5–3 mg per pulse, on the basis of which recommended values of specific energy input in the range of 2.2–2.6 kJ/mg for H₂ and 1.2–1.6 kJ/mg for He were established. The plasma temperature estimation for hydrogen at 0.8 eV is consistent with the measured plasma flow velocity of 16 ± 3 km/s. The conversion coefficient of the input electrical energy into the plasma flow energy was 65% in the entire studied range. The results obtained make it possible to predict the electrical discharge characteristics, cooling requirements and erosion rate for the first stage of a plasma rocket thruster.

Keywords: quasi-stationary high-current plasma accelerator, plasma rocket thruster