

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 533.9.07:544.558

ГЕНЕРАТОР МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ
ПЛАЗМЫ: РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ

©2026 г. М. Н. Васильев^{а*}, Т. М. Васильева^{б,**}

^а Объединенный институт высоких температур Российской академии наук

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 12, стр. 2

^б Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

Россия, 141701, Долгопрудный Московской области, Институтский пер. 9

*E-mail: mvasiliev2006@rambler.ru

**E-mail: tmvasilieva@gmail.com

Поступила в редакцию 18.03.2026

После доработки 25.07.2026

Принята к публикации 11.08.2026

Описана экспериментальная установка, предназначенная для генерации потоков холодной сильнонеравновесной плазмы инжекцией концентрированных электронных пучков в многокомпонентные газовые и парогазовые смеси, а также в газы, содержащие конденсированную дисперсную фазу, с химическим взаимодействием компонент плазмообразующих сред. Установка прошла полный цикл поэлементных и комплексных испытаний в непрерывных и импульсно-периодических режимах генерации до- и сверхзвуковых плазменных потоков в неограниченном пространстве и цилиндрических каналах в условиях планируемых физических и технологических экспериментов.

Ключевые слова: электронно-пучковая плазма, гибридная плазма, управление гетерофазным плазменным объемом

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди многочисленных плазмотехнических систем, используемых для получения больших объемов низкотемпературной плазмы, генераторы электронно-пучковой плазмы (ЭПП) занимают особое место благодаря особенностям способа ее возбуждения – инжекции электронных пучков (ЭП) в плотные газообразные среды [1]. Уже более 20 последних лет ЭПП исследуется и как интересный физический объект, и с точки зрения технологических приложений [2–4], однако в подавляющем большинстве известных публикаций рассматривается ЭПП чистых газов, хотя часто на практике плазмообразующей средой

является газ, в котором присутствуют достаточно крупные частицы конденсированной дисперсной фазы (КДФ), например, ЭПП, возбуждаемая в аэрозолях и парах в процессе их конденсации. Такая ЭПП остается практически не изученной, несмотря на то что рядом актуальных научно-технологических направлений результаты исследований многокомпонентной гетерофазной ЭПП весьма востребованы. К таким направлениям можно отнести планируемые активные эксперименты в космосе и ионосфере Земли [5, 6], задачи плазменной аэродинамики [7], исследования пылевой плазмы [8], активного броуновского движения микрочастиц в плазме при внешнем воздействии [9] и др.

Изучение свойств ЭПП даже в наиболее простой постановке задачи (слаботочный ЭП инжектируется в не контактирующий с какими-либо поверхностями неподвижный газ, в котором не происходят пламенно-стимулированные химические реакции) достаточно сложно и требует самосогласованного учета многочисленных и разнообразных электронно-кинетических, тепловых и плазмохимических процессов [10]. Ситуация радикально усложняется, когда ЭП инжектируется в газовый поток и/или когда в плазмообразующий газ вносятся частицы КДФ. В этих случаях к упомянутым выше процессам добавляются газодинамические явления и многофакторное взаимодействие быстрых электронов пучка и вторичных плазменных частиц (ионов, возбужденных частиц, плазменных электронов) с КДФ. Специального рассмотрения заслуживают способы управления многокомпонентной ЭПП с помощью внешних воздействий, в частности дополнительным электрическим полем, создаваемым в определенной зоне многокомпонентного плазменного потока. Трудности теоретического анализа и компьютерного моделирования столь сложных пучково-плазменных систем делают экспериментальные методы их исследования предпочтительными, а в ряде случаев единственно надежными.

Цель настоящей работы состояла в создании экспериментальной установки, в которой могут быть получены потоки ЭПП со сложными химическим и фазовым составами, отработаны способы управления такими плазменными образованиями, а также применительно к планируемым физическим и технологическим экспериментам выявлены допустимые диапазоны регулируемых параметров, в пределах которых установка способна поддерживать заданный режим работы.

Прототипом при разработке генератора многокомпонентной ЭПП послужила описанная в работе [11] установка, ряд систем и узлов которой был радикально модернизирован (см. разд. 2) с тем, чтобы обеспечить их работоспособность и системную совместимость в новых условиях эксплуатации. Генератор прошел полный цикл поэлементных и комплексных испытаний, результаты которых приведены в разд. 3.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

2.1. Принцип действия генератора многокомпонентной электронно-пучковой плазмы

Экспериментальная установка представляет собой сложный комплекс, в состав которого входят несколько совместно работающих и системно согласованных функциональных модулей и узлов. Принцип ее действия описывается следующей схемой. Генератор электронного пучка формирует сфокусированный ЭП в высоковакуумной камере, которая имеет независимую откачную систему. Пучок через выводное устройство инжектируется в рабочую камеру, заполняемую буферным газом и, взаимодействуя с ним, возбуждает ЭПП. Собственная откачная система, управляемая ПИД-регулятором, поддерживает в рабочей камере давление форвакуумного диапазона, на 3–6 порядков превышающее давление в высоковакуумной камере.

Газодинамическое сопло формирует в рабочей камере осесимметричную струю плазмообразующего и в общем случае другого, чем буферный, газа. При инжекции пучка в газовую струю генерируется поток ЭПП, состав и концентрации частиц в которой отличны от таковых для ЭПП буферного газа. В этот поток через форсунку или иным способом вводятся капельки диспергированной жидкости. При этом формируется поток многокомпонентной гетерофазной ЭПП, который и является объектом дальнейшего исследования.

Рассмотрим более подробно конструкции и работу основных систем и узлов экспериментальной установки.

2.2. Рабочая камера

Все эксперименты проводились при форвакуумном давлении плазмообразующего газа в рабочей камере в форме прямоугольного параллелепипеда объемом около 0.5 м^3 , изготовленной из нержавеющей стали. Камера оборудована низкочастотными электрическими и оптоволоконными вводами, а также проходными штуцерами для ввода газов и жидкостей. Для подсоединения к камере аппаратуры СВЧ-диагностики плазмы (см. разд. 2.8) были разработаны герметичные вводы, рассчитанные на частоту 25–40 ГГц (миллиметровый диапазон длин волн). Камера имела соосно расположенные фланцы для подключения к вакуумному трубопроводу и выводному устройству, а также вакуумно-плотные смотровые окна на боковых и верхней стенках.

2.3. Выводное устройство

Являясь ключевым элементом генератора ЭПП, выводное устройство (ВУ) в наших экспериментах выполняло следующие функции:

- осуществляло проводку ЭП из высоковакуумной камеры с давлением $P_{\text{ВВК}} \approx 10^{-5} - 10^{-6}$ торр, где он генерировался и формировался, в рабочую камеру с давлением $P_{\text{РК}}$, в которой могло варьироваться в широком диапазоне ($P_{\text{РК}} = 10^{-2} - 10^2$ торр);
- формировало осесимметричный газовый или парогазовый поток таким образом, чтобы ось газового потока и ось инъекции ЭП совпадали (ось z);
- независимо от газового потока отклоняло направление оси инъекции ЭП в плоскости, перпендикулярной оси z (по координатам x и y), для того чтобы ЭП оказывался направленным в заданную зону рабочей камеры, например, на какую-либо мишень;
- обеспечивало подключение к нему дополнительных устройств, например, газодинамических каналов, инжекторов жидкости и др.

Рисунок 1 иллюстрирует один из вариантов конструкции ВУ, который выполнял все перечисленные выше функции. ВУ представляло собой газодинамическое сопло с профилированным центральным телом 5. Внутри центрального тела установлена графитовая вставка 11 с тонким каналом, через который осуществлялась проводка ЭП. В зависимости от угла раскрытия конической части сопла φ сопло могло формировать дозвуковые и сверхзвуковые потоки газа, подаваемого в форкамеру сопла. В частности, при $\varphi = 0$ сопло формирует расходящуюся (на начальном участке – кольцевую) дозвуковую струю газа. Цилиндрический канал 10 в концевой части центрального тела коллимировал инжектируемый ЭП, уменьшая его начальную расходимость [10].

Обечайка 6 сопла имела специальное посадочное место, на которое могли устанавливаться дополнительные газодинамические каналы различной геометрии, например, изображенный на рис. 1 цилиндрический канал 9. На этом же посадочном месте могли монтироваться две пары электромагнитных катушек 7 для отклонения ЭП по координатам x и y .

Рис. 1. Принцип генерации ЭПП в газожидкостном потоке и вариант конструкции ВУ...

2.4. Формирование газожидкостных систем

Были отработаны три способа формирования газожидкостных систем, в которых возбуждалась ЭПП.

1. Жидкость непрерывно или отдельными порциями впрыскивалась в зону генерации плазмы буферного газа. В качестве инжекторов 8 использовались центробежные форсунки (рис. 2), форсунки дефлекторного типа и распылители со сталкивающимися струями жидкости. При впрыске одиночной тонкой струйки жидкости в высокоскоростной газовый поток происходило ее пневматическое распыливание, что

позволило использовать струйные форсунки (рис. 3). Прямоструйный впрыск в медленно текущий и, тем более, в неподвижный газ оказался неэффективным из-за неприемлемо большой длины распада жидких струй при форвакуумных давлениях $P_{\text{РК}}$.

2. Жидкость испарялась из открытого заранее помещенного в рабочую камеру сосуда внешним, например омическим, нагревом. Весьма эффективным оказался нагрев жидкости электронным пучком, направленным в сосуд с жидкостью с помощью отклоняющей системы (рис. 4).
3. Капельки жидкости образовывались конденсацией пара, который за счет диффузии распространялся от твердой или жидкой мишени, испаренной импульсом концентрированного ЭП.

В первом варианте жидкость подавалась к инжектору через регулятор расхода, управляемый собственным программируемым контроллером, а при одиночном впрыске – с помощью предварительно настраиваемого дозатора. Во втором варианте регулировалась мощность испарителя, а в третьем подбирались мощность и длительность импульса ЭП, испаряющего мишень.

Рис. 2. Пелена жидкости, образованная центробежной форсункой в потоке ЭПП воздуха

Рис. 3. Распыление жидкости, инжектированной струйной форсункой в поток ЭПП воздуха

Рис. 4. Формирование гетерофазной плазмообразующей среды электронно-лучевым испарением жидкости

2.5. Генератор электронного пучка

Остросфокусированный ЭП 3 (рис. 1) формировался электронной пушкой триодного типа с термоэмиссионным катодом из гексаборида лантана. Пушка 1 размещалась в высоковакуумной камере 2 с лучепроводом 4, который имел фланец для присоединения к корпусу ВУ. Длина лучепровода подбиралась так, чтобы кроссовер пучка оказывался во входной плоскости графитовой вставки ВУ. Собственная отклоняющая система пушки точно позиционировала фокальное пятно ЭП в отверстии ВУ.

Электронная пушка питалась от источника высокого напряжения и управлялась контроллером, который регулировал силу тока пучка I_b , начальную энергию электронов E_b и поддерживал как непрерывную генерацию ЭП, так и импульсно-периодический режим генерации с регулируемой частотой и скважностью импульсов. В обоих режимах сила тока

пучка или амплитуда его импульсов могли изменяться во времени по алгоритму, загружаемому в контроллер генератора ЭП перед началом эксперимента.

Общие параметры ЭП и диапазоны их регулировок: $E_b = 25\text{--}60$ кэВ, $I_b = 1\text{--}100$ мА, $j_b = 10^6\text{--}10^8$ А/м², диаметр пучка в кроссовере 0.8–1.5 мм, длительность импульсов 0.01–2.0 с, длительность паузы между последовательными импульсами 0.1–2.0 с.

2.6. Вакуумная система рабочей камеры

В рабочей камере создавался динамический вакуум: ее откачная система компенсировала натекание газа через ВУ и наработку паров распыленной или испаряемой жидкости. Поддержание предустановленного давления P_{PK} или его изменение, если того требовала программа эксперимента, обеспечивала система ПИД-регулирования, которая управляла производительностью откачки с помощью мотылькового клапана, установленного на откачной магистрали. Расход газа через ВУ G_g регулировался натекателем, независимо управляемым программируемым контроллером. В ходе эксперимента величина G_g могла поддерживаться постоянной или изменяться по определенному алгоритму, загруженному в контроллер.

2.7. Электродные системы

В гетерофазных пучково-плазменных системах – как в неподвижных облаках ЭПП, так и в плазменных потоках – удастся наводить дополнительные электромагнитные поля различных частотных диапазонов с целью управления плазменным объемом или инициирования и поддержания плазмохимических реакций [12]. Для наших тестовых экспериментов были разработаны игольчатые и сферические электроды, на которые подавалось постоянное напряжение U положительной или отрицательной полярности относительно стенок заземленной рабочей камеры. Электродные системы устанавливались в потоке или в неподвижном облаке ЭПП и могли быть конструктивно объединены с ВУ, а также с инжекторами или испарителями жидкостей. В тестовых плазмодинамических экспериментах активным электродом, как правило, служили модели, размещавшиеся в плазменном потоке.

2.8. Система диагностики плазменного объема

Неподвижная ЭПП и ее потоки, особенно если они содержат КДФ, представляют собой достаточно ярко светящиеся пламенные образования, для исследования которых вполне пригодны традиционные широкополосные оптические и спектральные методы. В ходе экспериментов велась обычная и высокоскоростная видеозапись, которая давала полезную качественную информацию о геометрии плазменных образований, а также о ее

эволюции при изменении условий генерации или под внешним воздействием. Дополнительную информацию о динамике капель жидкости удалось получить внесением в плазменное образование люминесцирующих при электронном облучении твердых частиц, которые имитировали жидкие частицы КДФ. С этой целью мы использовали порошки Al_2O_3 , дозированно вводившиеся в плазменный поток.

Спектральные методы оказались применимыми для исследования пространственных распределений плотности энерговыделения ЭП $Q(z, r)$, концентраций возбужденных частиц плазмы $n_j^*(z, r)$ (индекс j обозначает вид возбужденной частицы) и частиц КДФ $n_{КДФ}(z, r)$. Интерпретация данных спектральных и широкополосных оптических измерений базировалась на двух предположениях [10], а именно:

- излучение возбужденного газа и излучение частиц КДФ имеют различные спектры (линейчатый и непрерывный соответственно) и могут быть дифференцированы,
- интегральная и спектральная интенсивности излучения элементарного объема газа, возбужденного электронным пучком, пропорциональны энерговыделению пучка в этом объеме.

В тестовых плазмодинамических экспериментах (см. разд. 3.2) мы использовали традиционные методы диагностики газовых потоков: насадки полного давления для измерения скорости, $w(z, r)$ и миниатюрные термосенсоры различных типов для измерения температуры газа $T_g(z, r)$. Силовое воздействие на объекты, находившиеся в потоке ЭПП, измерялось с помощью специально сконструированных аэродинамических весов. Такие измерения позволили оценить, в частности, лобовое сопротивление частиц КДФ в плазменном потоке.

2.9. Системная совместимость элементов экспериментальной установки

В ходе разработки и поэлементных испытаний экспериментального комплекса удалось решить по крайней мере три принципиально важные проблемы, которые существенным образом влияют на ключевые технические характеристики установки и во многом определяют ее работоспособность.

1. Был подобран технологически удобный керамический материал для изготовления центрального тела газодинамического сопла, который совместим с углеродными материалами вставки (позиция 11 на рис. 1). Здесь важно отметить, что эффективность проводки ЭП и перепад давления газа, удерживаемый выводным окном ($P/P_{ВВК}$), в значительной мере зависят от температуры канала и возрастают при ее повышении. При рабочих температурах, близких к температуре сублимации графита, одиночная вставка оказалась достаточной для вывода примерно 80% мощности ЭП, а рассеиваемые в

канале ВУ 20% мощности расходовались на нагрев выводного тракта, т.е. опосредованно поддерживали высокую эффективность проводки ЭП. Уменьшение числа ступеней тракта проводки пучка сделало ВУ малогабаритным и существенно упростило его конструкцию по сравнению с ранее использовавшимися многоступенчатыми выводными окнами [11]. Именно поэтому ВУ удалось разместить внутри центрального тела газодинамического сопла. Важно, что уменьшение длины ВУ и разогрев газа в его канале значительно снизили потери не только интегральной мощности пучка, но и первичной энергии E_b в тракте транспортировки ЭП. Это позволило понизить ускоряющее напряжение электронной пушки вплоть до 25 кВ (по сравнению с ≈ 40 кВ в установке-прототипе), соответственно улучшив массогабаритные характеристики системы высоковольтного питания генератора ЭПП и радиационной защиты установки.

2. Для экспериментов с импульсным впрыском жидкостей, особенно легколетучих (например спиртов, эфиров, воды или ее паров), пришлось модернизировать систему ПИД-регулирования давления в рабочей камере, уменьшив ее инерционность. Кроме того, потребовался переход на более производительные откачные средства и вакуумные магистрали с многократно большим сечением, за счет чего увеличилась буферная емкость системы поддержания давления $P_{РК}$. Если этого оказывалось недостаточно, то для компенсации резких скачков давления при дозированном впрыске жидкостей рабочая камера дооснащалась криогенными панелями.
3. Известно, что когда в плазме, возбуждаемой электронным пучком, начинает действовать еще один источник ионизации, характеристики плазменного объема изменяются [10, 12]. В нашей установке эта особенность комбинированной плазмы проявляет себя в необходимости подбора режимов работы газоразрядных систем в потоке ЭПП, а также оптимизации их конструктивных и компоновочных решений. В ходе поэлементных и комплексных испытаний были отработаны различные варианты электродных систем, управляемым образом формирующих пробой именно в окружении ЭПП. Межэлектродное напряжение и его полярность, обеспечивавшие устойчивое формирование пробоев, зависели от силы тока пучка, компонентного состава плазмообразующей среды и скорости ее движения. В импульсно-периодических режимах работы установки совместимость газоразрядных систем и генератора ЭПП достигались подбором частоты, скважности и амплитуды импульсов, подаваемых на электроды.

3. МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ГЕНЕРАТОРА ПЛАЗМЫ

Поэлементные и комплексные испытания генератора ЭПП проводились для подтверждения эффективности новых технических решений, обеспечивающих функционирование ключевых элементов экспериментальной установки и их системной совместимости, выявления допустимых диапазонов регулировок параметров, определяющих режимы работы генератора, а также для выработки рекомендаций по постановке физических и технологических экспериментов с многокомпонентной ЭПП, возбуждаемой в газожидкостных средах и системах.

При испытаниях использовались неагрессивными газы (воздух и его компоненты, природный газ и его компоненты, инертные газы) и жидкости (метанол, этанол и их водные растворы, жидкие углеводороды (керосин), кремнийорганические жидкости). При этом не исключалась возможность протекания плазменно-стимулированных реакций с участием компонентов газожидкостных систем, например плазменно-стимулированное горение.

3.1. Генерация ЭПП в свободной струе газа

На рис. 5а представлена фотография свободной дозвуковой ($w \approx 200$ м/с) струи воздуха, сформированной цилиндрическим соплом, вдоль которой инжектировался ЭП ($E_b = 27$ кВ, $I_b = 20$ мА), а на рис. 5б – изображение неподвижного плазменного облака ($w = 0$) при том же давлении в окружающем газе ($P_{\text{РК}} = 5$ торр). Видно, что поперечные размеры плазменной струи существенно меньше, чем поперечные размеры неподвижного пучково-плазменного образования при прочих равных условиях. Это означает, что осесимметричная газовая струя коллимирует ЭПП, уменьшая расходимость ЭП и увеличивая пробег электронов. Наблюдаемые эффекты связаны с тем, что давление газа на оси струи существенно ниже, чем за ее пределами.

На рис. 5а хорошо видны треки люминесцирующих частиц (порошок Al_2O_3), которые в небольших количествах вводились в газовый поток внутри сопла. Эти треки, во-первых, визуализируют течение плазмы, а во-вторых, при использовании высокоскоростной видеосъемки позволяют оценить аэродинамические силы, действующие на частицы КДФ в плазменном потоке.

Рис. 5. Электронно-пучковая плазма воздуха, возбуждаемая непрерывным ЭП...

3.2. Обтекание сферы потоком гетерофазной ЭПП

Исследование обтекания тел простейшей геометрии потоками плазмы является одной из классических задач плазменной аэродинамики. Испытания генератора ЭПП проводились в привязке к планируемым экспериментам в этой области и были выполнены по следующей

методике. В ядре свободной струи ЭПП (см. предыдущий раздел) на специально разработанном держателе устанавливалось модельное тело сферической формы. Держатель крепил сферу на аэродинамических весах и был конструктивно объединен с фитингом для присоединения к гибкой трубке, через которую к сфере подводилась жидкость, и с электрическим коннектором, предназначенным для подачи на сферу высокого напряжения. В головной части модели размещалась струйная форсунка, через которую жидкость инжестировалась против потока плазмы.

На рис. 6а представлена картина обтекания сферы диаметром 10 мм потоком ЭПП воздуха, когда в поток инжестировался керосин, а на модель подавалось положительное относительно земли напряжение около 400 В. Давление в рабочей камере составляло 10 торр, а скорость потока газа на оси была примерно 300 м/с. Видно, что в перечисленных условиях между модельным телом и обечайкой сопла возникала ярко светящаяся зона, в которой, по-видимому, происходило плазменно-стимулированное горение воздушно-керосиновой смеси. Для сравнения на рис. 6б приведена фотография, сделанная после прекращения подачи керосина: на ней зона горения не наблюдается. В ходе тестовых экспериментов скорость потока, давление $P_{РК}$, величина и полярность напряжения U , подаваемого на сферу, варьировались, чтобы накопить информацию, качественно характеризующую наблюдаемые явления.

Рис. 6. Обтекание сферы диаметром 10 мм потоком ЭПП воздушно-керосиновой смеси...

Переход на сверхзвуковые скорости набегающего потока (число Маха $M \leq 1.8$) выполнялся с целью отработки методики измерения аэродинамических сил, действующих на модельное тело, прежде всего его лобового сопротивления, в условиях обтекания гетерофазной ЭПП химически реагирующих компонентов. При этом основное внимание уделялось конструкции аэродинамических весов в комбинации с держателем модельных тел, а также технике инициирования и поддержания плазменно-стимулированных реакций.

3.3. Генерация ЭПП газожидкостной среды, протекающей в цилиндрическом канале

Плазменно-стимулированное горение в воздушно-керосиновом и кислородно-керосиновом потоках удалось наблюдать и в канале, вдоль которого инжестировался ЭП. Процесс инициировался в зазоре между двумя электродами с напряженностью поля около 200–300 В/см, недостаточной для возникновения между ними высоковольтного разряда при отсутствии ЭП. Инжекция ЭП, во-первых, снижала напряжение U , необходимое для поддержания разряда в межэлектродном промежутке, а во-вторых, активировала плазмообразующую смесь, которая образовывалась при пневматическом распыливании струйки керосина (мы использовали струйную форсунку) в потоке плазмообразующего газа.

На рис. 7а представлена фотография канала (кварцевая трубка внутренним диаметром 22 мм) с плазмой, возбуждаемой непрерывным ЭП ($E_b = 28$ кэВ, $I_b = 15$ мА) при $P_{PK} = 7$ торр. Скорость потока на оси канала $w \approx 100$ м/с. Видно, что зона горения располагалась вниз по потоку за электродной системой. Для сравнения на рис. 7б приведена фотография, сделанная после прекращения подачи керосина: на ней зона горения не наблюдается, зато вокруг электродов виден газовый разряд, поддерживаемый ЭП. Когда пучок выключался, никакого свечения внутри канала, в том числе в при- и межэлектродной зонах, не было.

Рис. 7. Генерация потока ЭПП воздушно-керосиновой смеси в цилиндрическом канале...

3.4. Генерация гетерофазной ЭПП в теплоизолированном контейнере

Еще один цикл испытаний был выполнен при использовании каналов с глухим задним торцом (рис. 8а), т.е. внутри контейнера, полностью локализирующего плазменный объем. В этой конфигурации для выпуска плазмообразующей среды, поступавшей в канал из газового сопла и инжекторов жидкости, в цилиндрической стенке контейнера имелось отверстие. С учетом специфики планируемых физических экспериментов наружные стенки канала были покрыты слоем теплоизоляции, что позволило повысить температуру газа внутри контейнера вплоть до $T_g \approx 1000$ К. На высоких уровнях мощности ЭП ($I_b > 25$ мА) его энерговыделение было достаточным для прогрева контейнера за время около 10 мин; для сокращения времени предварительного прогрева контейнера и достижения более высоких температур газа, особенно при умеренных мощностях ЭП, использовались дополнительные хомутовые керамические нагреватели. Температура T_g измерялась термосенсором, который устанавливался в выходном сечении отверстия таким образом, чтобы исключить его облучение быстрыми электронами пучка, способного исказить результаты измерений.

В ходе предварительных тестовых экспериментов на чистом аргоне в качестве плазмообразующей среды было обнаружено весьма интересное физическое явление: из отверстия в стенке контейнера истекала светящаяся струя возбужденного газа (рис. 8б). Важно, что в этой струе ЭП не действует на газ, т.е. свечение истекающего газа можно приписать только деградации ранее возбужденных долгоживущих частиц ЭПП, наработанных, пока газ находился в контейнере. Дозированный впрыск жидкости (воды или этанола) подавлял генерацию долгоживущих возбужденных состояний молекул аргона: свечение за пределами контейнера ослабевало или исчезало совсем. Обнаруженный эффект послужил основой планирования специальной серии экспериментов по исследованию влияния различных добавок на распад ЭПП чистых газов.

Отдельный раздел программы поэлементных испытаний был посвящен изучению применимости открытых бочкообразных СВЧ-резонаторов для измерения концентрации

электронов n_{ep} в ЭПП, возбуждаемой в газожидкостных системах (рис. 9а). Ранее мы успешно использовали эти устройства для исследования ЭПП чистых газов [13]. В проведенных тестовых экспериментах резонатор с рабочей длиной волны около 1 мм устанавливался соосно с радиопрозрачным контейнером, а жидкость дозированно впрыскивалась выше по потоку плазмы, т.е. до входного сечения резонатора. Накопленные результаты тестов служат основой для постановки экспериментов по исследованию электрофизических свойств ЭПП жидких аэрозолей и парогазовых смесей.

Рис. 8. Генерация потока ЭПП аргона в цилиндрическом контейнере...

Рис. 9. Формирование гетерофазной ЭПП испарением мишени (полиэтилен высокой плотности) под действием концентрированного импульсного ЭП в гелии

3. 5. Генерация гетерофазной ЭПП в потоке конденсирующегося пара

Удобными объектами исследования многокомпонентной ЭПП являются пламенные образования, диффундирующие от поверхности твердой (или жидкой) мишени, локально нагреваемой концентрированным ЭП. На рис. 9а приведены фотографии, сделанные в момент испарения полиэтилена высокой плотности импульсом ЭП длительностью около 0.5 с и спустя некоторое время Δt вторым импульсом пучка той же длительности (рис. 9б). Второй импульс возбуждал ЭПП в сгустке, который двигался от поверхности мишени и содержал пары полиэтилена в смеси с буферным газом (гелий, $P_{PK} = 10$ торр) и успевшими сконденсироваться жидкими и твердыми частицами. При использовании средств оптической диагностики последовательность повторных импульсов с изменяющейся величиной Δt дает информацию об эволюции компонентного состава и ряда свойств плазменного сгустка, а также о скорости его движения. Даже на обычных фотографиях видно, что сгусток гетерофазной пучковой плазмы может практически полностью экранировать распространение ЭП. Видно также, что парогазовая фаза ЭПП движется быстрее конденсированной фазы, что визуально проявляется как увеличение диаметра плазменного канала в промежутке между сгустком и ВУ, где КДФ отсутствует.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом проделанной работы стало создание устройства (генератора ЭПП в системах газ-жидкость) с расширенными функциональными возможностями, в котором реализованы многие полезные особенности как способа возбуждения плазмы (некритичность к выбору химического и фазового составов плазмообразующей среды, отсутствие контракции плазменного объема при повышении ее давления, широкий диапазон температур

возбуждаемой плазмы и ее высокая химическая активность), так и самого устройства (отсутствие электродов в конструкции собственно генератора плазмы, большая глубина регулировок режимов работы и малая инерционность при их смене). В устройстве конструктивно объединены разнородные по своему назначению элементы (газодинамическое сопло, выводное устройство для ЭП, инжекторы жидкости). При этом удалось обеспечить высокую системную совместимость этих элементов между собой и с другими подсистемами экспериментальной установки, сохранив достоинство устройства-прототипа – его многофункциональность.

Адаптивность разработанного устройства была продемонстрирована в поэлементных и комплексных испытаниях. В ходе испытаний не только отрабатывались конструктивные и схемные решения генератора ЭПП, но и выявлялись диапазоны регулировок рабочих параметров, в пределах которых обеспечиваются его надежность и управляемость. Испытания генератора проводились в привязке к планируемым физическим и технологическим экспериментам в области плазменной аэродинамики, активных пучково-плазменных экспериментов в ионосфере Земли и в космосе, разработки новых плазмохимических процессов и аппаратов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев М.Н.* Применение электронно-пучковой плазмы в плазмохимии. В кн.: Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Под ред. В.Е. Фортова. Москва: Наука, 2001. Т. XI. С. 436
2. *Leonhardt D., Muratore C., Walton S.* IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. V. 33. № 2. P. 783. <https://doi.org/10.1109/TPS.2005.844609>
3. *Tyunkov V., Oks E.M., Yushkov Yu.G., Zolotukhin D.B.* Catalysts. 2022. V. 12. № 5. P. 574. <https://doi.org/10.3390/catal12050574>
4. *Vasiliev M., Vasilieva T.* Materials production with Beam Plasmas. Encyclopedia of Plasma Technology., FL, USA, Boca Raton: Taylor & Francis, 2017. P. 152.
5. *Delzanno G. L., Borovsky J. E., Thomsen M. F., Moulton J. D., MacDonald E. A. J.* Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120. P. 3647. <https://doi.org/10.1002/2014Ja020608>
6. *Farr B., Wang X., Goree J., Hahn I., Israelsson U., Horanyi M.* Acta Astronaut. 2020. V. 177. P. 405. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.08.003>

7. *Deng Y.F., Tan Y.H., Han X.W.* Proc. IEEE Int. Conf. Plasma Sci. (ICOPS). Antalya, Turkey, 2015. P. 100. <https://doi.org/10.1109/PLASMA.2015.7179610>
8. *Beckers J., Berndt J., Block D. et al.* Phys. Plasmas. 2023. V. 30. P. 120601. <https://doi.org/10.1063/5.0168088>
9. *Svetlov A.S., Vasiliev M.M., Kononov E.A., Petrov O.F., Trukhachev F.M.* Molecules. 2023. V. 28. P. 1790. <https://doi.org/10.3390/molecules28041790>
10. *Васильева Т.М.* Физические основы проектирования пучково-плазменных систем. Москва: МФТИ, 2024.
11. *Vasiliev M., Vasilieva T.* Inst. Exp. Tech. 2024. V. 67. № 1. P. 189. <https://doi.org/10.1134/S0020441224700088>
12. *Vasiliev M., Vasilieva T.* J. App. Phys. 2025. V. 137. P. 203301. <https://doi.org/10.1063/5.0253933>
13. *Александров Н.Л., Васильев М.Н., Лысенко С.Л., Махир А. Х.* Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 5. С. 466. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9176017>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Принцип генерации ЭПП в газожидкостном потоке и вариант конструкции ВУ: 1 – электронная пушка, 2 – высоковакуумная камера, 3 – электронный пучок, 4 – лучепровод, 5 – центральное тело газового сопла, 6 – обечайка газового сопла, 7 – отклоняющая система, 8 – инжектор жидкости, 9 – газодинамический канал, 10 – коллимационный канал, 11 – графитовая вставка, 12 – рабочая камера. G_1 – расход жидкости, вводимой через инжектор, G_g – расход газа
- Рис. 2.** Пелена жидкости, образованная центробежной форсункой в потоке ЭПП воздуха
- Рис. 3.** Распыление жидкости, инжектированной струйной форсункой в поток ЭПП воздуха
- Рис. 4.** Формирование гетерофазной плазмообразующей среды электронно-лучевым испарением жидкости
- Рис. 5.** Электронно-пучковая плазма воздуха, возбуждаемая непрерывным ЭП ($E_b = 27$ кэВ, $I_b = 20$ мА, $P_{PK} = 5$ торр): **а** – свободная дозвуковая струя ($w \approx 200$ м/с), сформированной цилиндрическим соплом, **б** – неподвижное плазменное облако ($w = 0$)
- Рис. 6.** Обтекание сферы диаметром 10 мм потоком ЭПП воздушно-керосиновой смеси ($w \approx 300$ м/с); на сферу подано положительное напряжение $U \approx 400$ В: **а** – керосин инжектируется против набегающего потока ЭПП струйной форсункой, размещенной в головной точке сферы; **б** – подача керосина прекращена
- Рис. 7.** Генерация потока ЭПП воздушно-керосиновой смеси в цилиндрическом канале внутренним диаметром 22 мм с плазмой, возбуждаемой непрерывным ЭП ($E_b = 28$ кэВ, $I_b = 15$ мА) при $P_{PK} = 7$ торр. Скорость потока на оси канала $w \approx 100$ м/с: **а** – керосин инжектируется струйной форсункой, **б** – подача керосина прекращена
- Рис. 8.** Генерация потока ЭПП аргона в цилиндрическом контейнере диаметром 22 мм с глухим задним торцом. **а** – Схема эксперимента: 1 – контейнер, 2 – теплоизоляция, 3 – термосенсор, 4 – истекающий газ, 5 – резонатор, 6 – форсунка, 7 – обечайка сопла. **б** – Истечение ЭПП аргона из отверстия в стенке теплоизолированного контейнера в невозбужденный газ (аргон)
- Рис. 9.** Формирование гетерофазной ЭПП испарением мишени (полиэтилен высокой плотности) под действием концентрированного импульсного ЭП в гелии при $P_{PK} = 10$ торр: **а** – начальная фаза процесса (момент импульсного воздействия, $t = 0$), **б** – развитая фаза процесса (второй импульс пучка, $t = 2$ с)

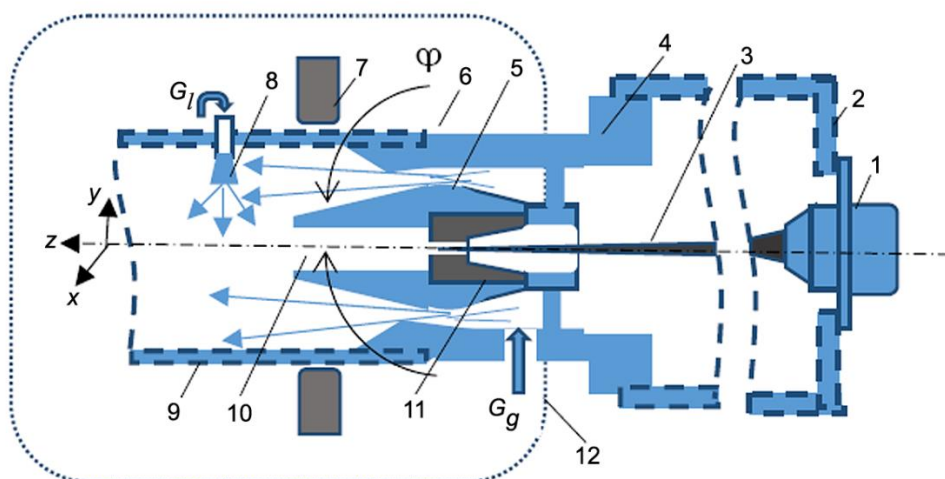


Рис. 1.



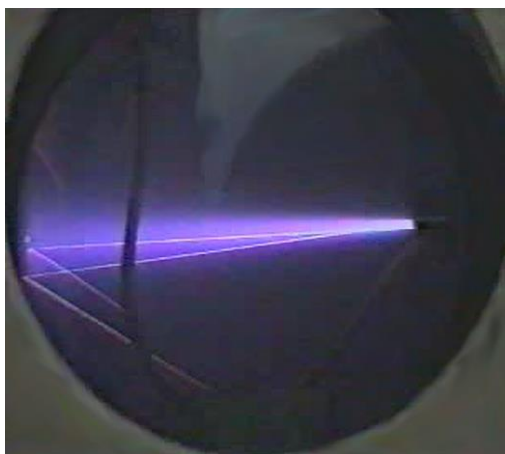
Рис. 2.



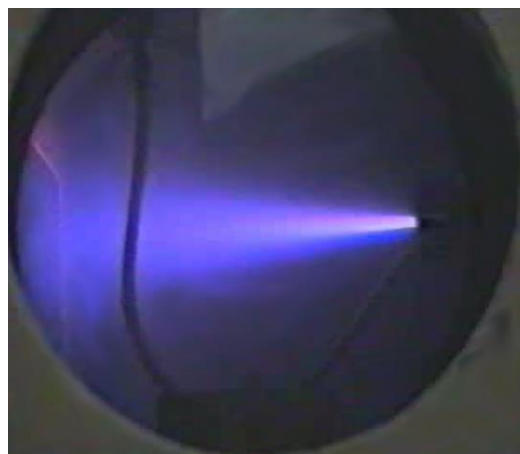
Рис. 3.



Рис. 4.

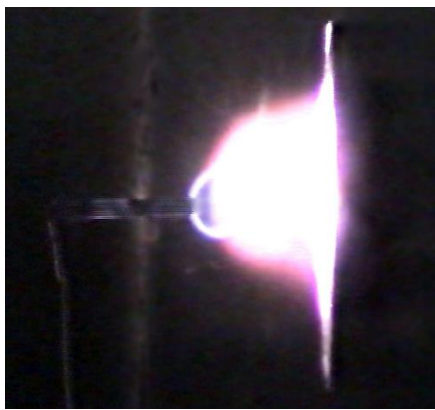


а)

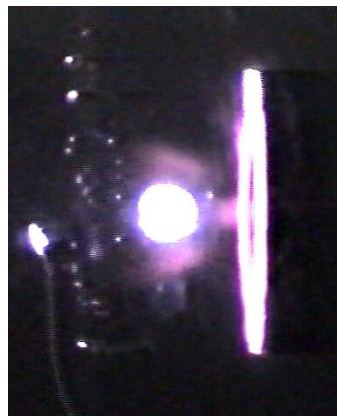


б)

Рис. 5.



а)



б)

Рис. 6.

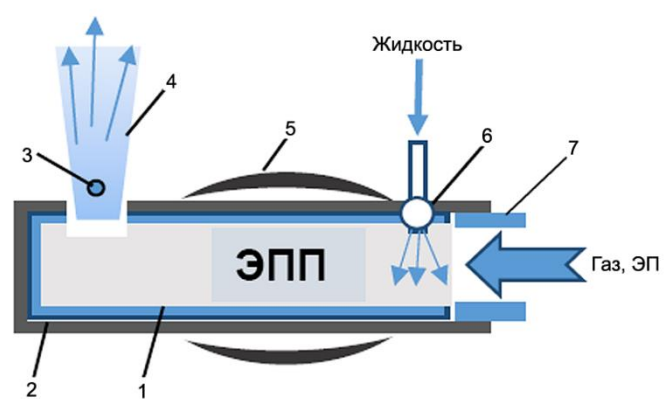


а)



б)

Рис. 7.



а)



б)

Рис. 8.



а)



б)

Рис. 9.