

АЛЬТЕРНАТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ РАКЕТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ кГц-РАЗРЯДА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Г. Н. Чурилов^{1, 2} ✉, К. А. Финников², Н. С. Николаев^{1, 2}

¹Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН,
г. Красноярск, Российская Федерация

²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

Знания, полученные в результате детального исследования физики газового разряда, легли в основу разработки и изготовления ракетных плазменных двигателей. Дальнейший прогресс в этом направлении разработчики связывают с увеличением плотности рабочего тела – плазмы. Однако увеличение плотности газа, в котором осуществляется разряд, влечет возникновение ионизационной и перегревной неустойчивостей, которые в конечном результате приводят к контракции разряда. Это является основным препятствием на пути получения устойчивых плазменных потоков при высоком давлении и разработки на их основе плазменных двигателей. В этой работе, на примере изготовленных лабораторных вариантов плазменных генераторов, решающих конкретные народно-хозяйственные задачи, показана возможность обойти эту проблему путем применения дугового разряда переменного тока высокой частоты. Приводятся экспериментальные результаты по их применению для устройств, работающих при атмосферном давлении с использованием в качестве плазмообразующего газа аргона, гелия и воздуха. Представлены результаты исследования конструкции плазматрона, в котором совмещены магнитная и вихревая стабилизации. Эта конструкция рассматривается в качестве прототипа ракетного плазменного двигателя, работающего, например, на воздушно-метановой и кислородно-метановой смесях.

Ключевые слова: ракетные плазменные двигатели, плазма, переменный ток, килогерцовый диапазон, неустойчивости плазмы, дуговые разряды атмосферного давления.

Введение

Многие проблемы физики газовых разрядов в настоящее время уже преодолены и технические решения, полученные на их основе, воплощены в космических аппаратах [1] и др. Как в России, так и за рубежом имеется большой опыт теоретических и практических исследований плазменных потоков. Для генерации плазмы обычно применяют плазматроны, в которых в качестве источника питания используется постоянный или переменный ток, в СВЧ или радиочастотном диапазоне. Все они имеют свои достоинства и недостатки. Поведение плазмы и ее свойства необходимо рассматривать совместно с источником питания, схемой согласования и характеристиками элементов, которые входят в состав этой схемы. Так как име-

ется зависимость характерных времен различных переходных процессов, установления различного вида неустойчивостей в плазме, то, наряду со свойствами среды и динамики газовых потоков, определяющими параметрами являются частота питающего разряд электрического поля и воздействующее на плазму магнитное поле. Обычно выделяют два предельных случая: когда период изменения питающего поля много меньше времени установления распределения электронов по энергиям, и когда такой период – много больше. В основном исследователи занимаются рассмотрением двух этих предельных случаев. Плазма, получающаяся на постоянном токе, обычно имеет высокую плотность и склонна к контракции разряда. В этом случае требуется разработка сложных систем стабилизации для борьбы с большой эрозией электродов [2]. Плазма переменного тока МГц-диапазона является высокостабильной, однако в ней имеется существенная разница в под-

✉ churilov@iph.krasn.ru

вижности ионов и электронов. В этом диапазоне частот при согласовании разрядов с источником питания необходимо учитывать реактивную компоненту как самих разрядов, так и подводных цепей. Емкостные и индукционные разряды требуют существенного понижения давления рабочего тела [3], что в некоторых случаях является недостатком.

Неустойчивости в плазме дугового разряда

Дальнейшее развитие ракетных плазменных двигателей (РПД) связано с увеличением удельной тяги, которая напрямую зависит от плотности используемых плазменных потоков. Одной из проблем, мешающих достигнуть желаемых плотностей, являются ионизационная и перегревная неустойчивости. Эти неустойчивости приводят к установлению сильно неоднородного распределения степени ионизации и электропроводности. Ток стягивается в узкий шнур, что препятствует осуществлению управления плазменным течением с помощью пондеромоторной силы, поскольку токовый шнур не может эффективно обмениваться импульсом с основной частью потока, плотность тока в которой гораздо слабее. Природа ионизационных и тепловых неустойчивостей разрядов исследовалась достаточно подробно. Итоги исследований вошли в учебники и книги, описывающие физику газового разряда [4; 5]. Известно, что в разных условиях возможно развитие неустойчивостей по двум основным механизмам.

Ионизационная неустойчивость возникает в результате роста скорости рождения свободных электронов, что приводит к росту концентрации электронов. Подобная ситуация возникает в неравновесной плазме как следствие того, что функция распределения электронов в области энергий порядка 10 эВ, как и концентрации возбужденных частиц, сильно ниже своих равновесных значений. С ростом концентрации электронов этот разрыв быстро уменьшается в результате возрастания влияния столкновений электрон-электрон и электронно-столкновительных переходов нейтральных частиц. По этой причине возможна зависимость скорости ионизационных процессов

$$\left(\frac{dn_e}{dt}\right)_{\text{иониз.}} \approx \text{const} \cdot n_e^k, \quad k > 2,$$

и, в условиях преобладания двухчастичных рекомбинационных процессов с

$$\left(\frac{dn_e}{dt}\right)_{\text{рекомб}} = \text{const} \cdot n_e^2$$

баланс частиц электронной компоненты становится неустойчивым.

Перегревная неустойчивость возникает как следствие растущей зависимости энерговыделения в плазме от удельной внутренней энергии. Развитие перегривной неустойчивости возможно как в равновесной, так и в неравновесной плазме. Время развития ионизационной неустойчивости может быть очень малым в сравнении с временами развития перегривной, поскольку первое определяется динамикой электронного газа, тогда как второе – динамикой выравнивания неоднородности давления среды. В то же время, процесс развития ионизационной и перегривной неустойчивостей в полях диапазона десятков и сотен кГц практически не изучен. Во многом это является следствием того уже отмеченного обстоятельства, что разряды в данном диапазоне частот не рассматривались как интересные в плане практических приложений. Известно, что в высокочастотном поле, в том числе и в электродных разрядах, возможно поддерживать диффузный тлеющий разряд при давлениях вплоть до атмосферного [6; 7]. Одной из причин такого поведения разряда может быть эффект запираения ионов – полупериод поля много меньше времени пролета иона через разрядный промежуток. Другой важный фактор нестационарности поля – чередование периодов высокой и низкой величины поля. Поскольку скорость ионизации имеет резкую зависимость от напряженности электрического поля, ионизационный процесс протекает за короткие периоды, в течение которых напряженность поля ниже максимальной не более чем на 10–20 %. Протяженность этих периодов составляет величину ~ 1 мкс. Ионизационные процессы при этом приобретают сходство с процессами, происходящими в случае развития разряда в импульсном электрическом поле, которое устойчиво и приводит к формированию диффузной структуры разряда [8]. В условиях сильного поля многие механизмы, необходимые для развития ионизационной неустойчивости, оказываются подавленными. В частности, основным механизмом ионизации может стать не ступенчатая ионизация, а ионизация из основного состояния. Похожий эффект может проявляться, хотя и не столь существенно, в гармонически изменяющемся поле. Существенным также является влияние частоты поля на форму функции распределения электронов по энергии. Известно, что в высокочастотном поле при определенных условиях формируется бимаксвелловское распределение электронов по энергии [9], причем эффективная температура электронов в области высоких энергий (в районе 10 эВ и выше) выше, чем в области низких. В такой ситуации подавлена ионизационная неустойчивость, поскольку высокая концентрация электронов соответствует равновесной функции распределения. Вследствие этого снижается доля электронов, имеющих энергию, до-

статочную для ионизации или возбуждения нейтральной частицы. Данный эффект наблюдается для сравнительно высоких частот (десятки мегагерц) и при низких давлениях (1 мбар и ниже). В этих условиях частота поля сопоставима с частотой потери импульса электрона. В условиях более высоких давлений и более низких частот (100 кГц при давлениях выше 1 мбар) частота поля может быть сопоставима с другой характерной частотой, соответствующей динамике электронной компоненты – с частотой потери энергии электрона. В этих случаях функция распределения будет нестационарна. В соответствии со сказанным выше, предотвратить развитие неустойчивости можно путем использования переменного электрического поля для возбуждения разряда и поддержания ионизованного состояния. Применяя магнитное поле, изменяющееся синфазно с током разряда, можно обеспечить постоянство направления поперечной силы и задержку перехода разряда в сильно контрагированное состояние. При определенных частотах электрического поля, геометрии плазменного потока и условиях его взаимодействия с внешним синфазным магнитным полем неоднородность ионизации может не успевать переводить разряд в фазу высокой контракции, при которой разрушаются электроды и теряют устойчивость плазменные потоки.

Дуговой разряд переменного тока кГц-диапазона

Задолго до того как в мире появились силовые полупроводниковые элементы, а также мощные магнитопроводы, конденсаторы с высокой емкостью и малыми потерями, работающие в диапазоне до 10^3 кГц, работы по исследованию генерации плазмы в этом диапазоне проводились как в Советском Союзе, так и за рубежом. В основном использовались ламповые генераторы. Однако в СССР транзисторные усилители, позволяющие применять мощности, составляющие десятки и сотни кВт в указанном выше диапазоне, появились намного раньше. С появлением транзисторных усилителей возможность использования высокочастотного (ВЧ) диапазона существенно возросла. Действительно, уменьшились габариты установок, увеличился их КПД. Для ламповых генераторов КПД составляет 40 %, а для генераторов на транзисторах – более 90 %.

С первых шагов работы в области получения плазмы в кГц-диапазоне мы столкнулись с рядом трудностей, связанных с вопросами согласования источников питания и разрядов. Необходимо было подводить энергию по линиям с низкой индуктивностью или компенсировать индуктивную компоненту емкостной. Первые же результаты наших исследований показали, что

как процессы генерации плазмы, так и сама плазма в кГц-диапазоне существенно отличаются от постоянного тока и МГц-диапазона.

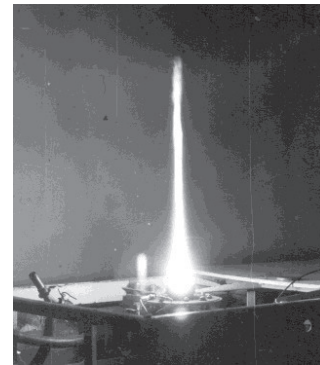


Рис. 1. Фотография струи углеродной плазмы

На рис. 1 приведена фотография струи плазмы, образующейся в результате разряда между графитовым стержнем и графитовой втулкой, имеющей сечение – усеченный конус с осевым отверстием, в открытом пространстве, без введения какого-либо газа. Длина струи – 0,75 м, ток дуги – 500 А. Температура плазменной струи вдоль оси изменялась от 5500 К до 2000 К на расстоянии 0,01 м и 0,75 м соответственно [10]. Диаметр сопла такого генератора углеродной плазмы составляет 10^{-2} м. Для плазменных генераторов на постоянном токе длина струи достигает всего нескольких калибров выходного отверстия, т.е. для нашего случая она могла бы быть всего $(3-4) \cdot 10^{-2}$ м. На основе такого разряда была разработана установка для синтеза фуллеренов при атмосферном давлении гелия в камере. Следует заметить, что это позволило нам исключить из технологии процесс поддержания низкого давления в течение синтеза. Наша установка отличается высокой производительностью и низкой себестоимостью получаемых фуллеренов и других нанодисперсных углеродных продуктов. Сейчас внимание исследователей привлекают эндоздральные металлофуллерены (ЭМФ), молекулы которых содержат внутри своего замкнутого каркаса из атомов углерода атом металла, чаще всего редкоземельного элемента. С фундаментальной точки зрения такая молекула интересна, так как она имеет структуру, похожую на атом. Внутри отрицательно заряженной оболочки находится положительно заряженный ион металла, поэтому ее часто называют «сверхатомом». С прикладной точки зрения ЭМФ также интересны из-за большого количества возможностей их применения в медицине, электронике и т.д. Основная проблема проведения широкомасштабных исследований ЭМФ как прикладных, так и фундаментальных – это низкая производительность методов синтеза. Применение плазмы кГц-диапазона позволило нам разработать установки, произво-

длительность которых существенно превышает мировой уровень [11–13].



Рис. 2. Фотография ВЧ дугового разряда между холодными медными электродами, при пониженном давлении

Исследования разрядов с холодными металлическими электродами в кГц-диапазоне показали, что даже для больших токов их эрозия на 2–3 порядка меньше, чем для разрядов постоянного тока. Разряды имеют диффузный характер, при этом плазма по параметрам соответствует плазме дугового разряда постоянного тока. На рис. 2 мы можем видеть разряд между кольцевым электродом из медной трубки, выполняющим еще и функцию индуктора, по которому протекает ток и вода, и металлическим стержнем, также охлаждаемым водой. Ток разряда и ток, протекающий по металлическому кольцу, совпадают по частоте и фазе. Если плоскость кольцевого электрода пересекает ось стержня, то плазма равномерно его заполняет и мы можем видеть плазменное кольцо. Скоростная съемка показала, что плазменное кольцо на самом деле это вращающийся плазменный «сгусток», который образуется в результате взаимодействия радиальной компоненты тока разряда и осевой компоненты магнитного поля кольцевого электрода. Малая эрозия разрядов в кГц-диапазоне позволила использовать эти разряды для разработки устройств эмиссионной спектроскопии и очистки цветного проката, которые защищены соответствующими патентами [14; 15].

Экспериментальная реализация концепций создания плазменных двигателей питаемых током кГц-диапазона

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 в область приоритетных направлений попали исследования РПД двигателей (необходимость эффективного освоения космического и воздушного пространства). Мы обобщили накопленный

опыт генерации плазмы в области электрических и магнитных полей кГц-диапазона и изготовили лабораторный вариант плазменного генератора. Этот плазменный генератор может быть прототипом двигателя, начальное давление рабочего тела которого имеет атмосферное или более высокое давление. В основу разработки нами были положены следующие концепции:

1. Применение токов кГц-диапазона позволяет избежать развития наиболее опасных неустойчивостей – ионизационной и перегревной при атмосферном и более высоких давлениях.

2. Плазма имеет параметры, соответствующие дуговому разряду при диффузном характере.

3. Эрозия металлических электродов на 2–3 порядка ниже эрозии электродов, используемых в разрядах на постоянном токе.

4. Применение магнитного поля, синфазного с током разряда, позволяет управлять плазменными потоками.

На основе ВЧ разряда между металлическими электродами в потоке аргона с рабочей частотой тока 40–400 кГц нами разработана конструкция дугового плазменного генератора. В плазменном генераторе использована стабилизация, основанная на применении тока разряда и тока катушки, обеспечивающей осевое магнитное поле, сдвиг фазы между которыми равен нулю, а также применении вихревого потока термоизолирующего газа.

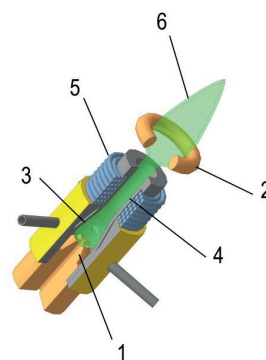


Рис. 3. Схема генератора плазменного потока

На рис. 3 представлено схематическое изображение этого устройства, где 1 – торцевой электрод с отверстием для подачи плазмообразующего газа, 2 – кольцевой электрод, 3 – предварительная камера закрутки термоизолирующего газа, 4 – разрядная камера, 5 – соленоид для создания стабилизирующего магнитного поля, 6 – плазменный поток.

Разряд осуществляется между электродом 1, выполненным из охлаждаемого водой стержня, и электродом 2, выполненным в виде металлического охлаждаемого водой кольца. Плазмообразующий газ подается через осевое отверстие электрода 1. Термоизолирующий газ через тангенциально рас-

положенные к оси генератора штуцера подается в предварительную камеру 3 и приобретает вращательное движение относительно оси. Поток вращающегося газа поступает в разрядную камеру 4. Ток, протекающий по катушке 5, синфазный с током разряда, образует магнитное поле, которое в соответствии с законом Ампера и силой Лоренца осуществляет стабилизацию разряда. По электроду 2 протекает ток, синфазный с током в катушке 5 и совпадающий с ним по частоте. Разрядная и предварительная камеры выполнены из керамики. Электроды выполнены из меди. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон, а в качестве термоизолирующего – воздух, который подавался компрессором. Фотография плазменного потока и его спектрально полученные характеристики (температура и электронная концентрация) приведены на рис. 4 (а и б соответственно). При диаметре выходного сопла 8 мм, диаметр плазменного потока в разрядном промежутке составляет 4,2 мм. Сжатие потока осуществляется за счет действия системы стабилизации, описанной выше. В соответствии с геометрическими размерами электрода-индуктора плазменный поток расширяется до диаметра 23 мм. При этом высота выброса плазмы, измеряемая от внешней поверхности кольцевого электрода-индуктора, составляет 120 мм (рис. 4а).

Экспериментальным путем было установлено, что эта высота зависит от внутреннего радиуса кольцевого электрода сильнее, чем от расходов плазмообразующего и термоизолирующего газов. Спектры были получены на спектрографе PGS-2 с цифровой системой регистрации ФЭК-9. Температура разряда измерялась методом относительных интенсивностей, с использованием спектральных линий меди (510,5 и 521,8 нм). Измеренные хордовые значения интенсивностей были пересчитаны с помощью преобразования Абеля, было получено истинное радиальное распределение интенсивностей в зависимости от радиуса разряда (рис. 4а).

Вольтамперные характеристики применяемого в плазменном генераторе разряда представлены на рис. 5.

При переходе через нуль наблюдается резкое возрастание напряжения. Оно достигает максимального значения 380 В при токе 0,5 А. Затем напряжение падает до 26 В при токе 1 А. Далее наблюдается рост напряжения и тока до максимального напряжения 178 В при токе 12,6 А. При амплитудном значении тока 13,0 А, напряжение достигает значения 162 В. Далее наблюдается падение напряжения и тока до нуля. В отрицательном полупериоде данный процесс повторяется, однако наблюдается асимметрия полупериодов. Исходя из геометрических размеров плазменного потока, можно выделить четыре области за полупериод с различной электропроводностью плазмы. На от-

резке ОА удельная электрическая проводимость составляет 11,6 См/м. На отрезке АВ – 12,4 См/м, ВС – 656,8 См/м, СО – 682,2 См/м. Действующее значение мощности разряда – 1,4 кВт.

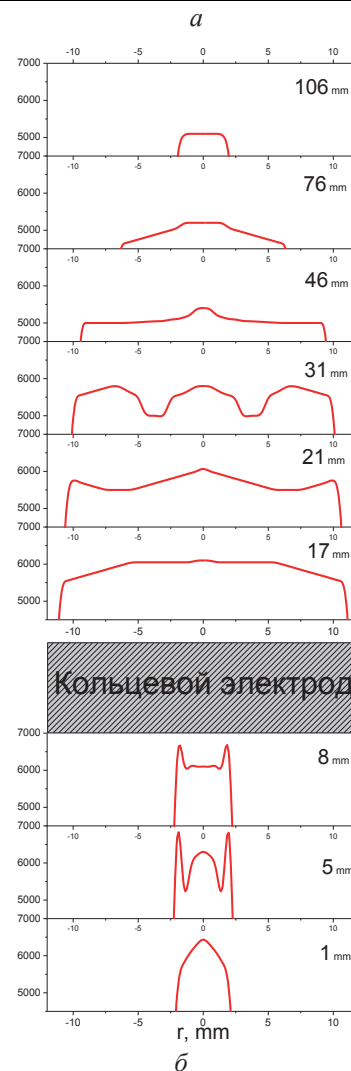
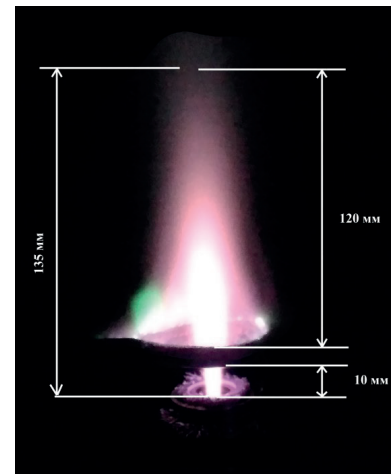


Рис. 4. а – фотография разряда с характерными размерами; б – распределение температуры разряда вдоль разрядного промежутка и на выходе из плазматрона, на различных сечениях по высоте. Погрешность измерений – 1,3 %

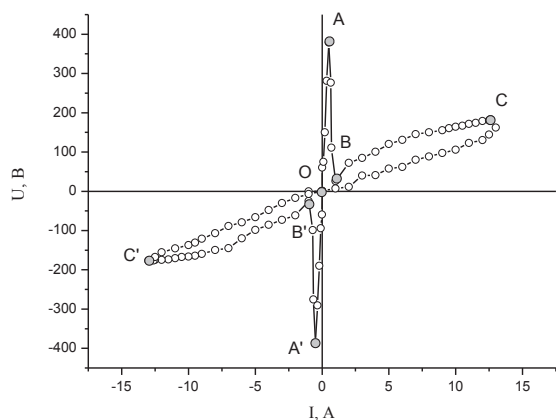


Рис. 5. Вольтамперная характеристика плазматрона, питаемого током кГц-диапазона. Погрешность измерений – 0,2 %

Кольцевой электрод-индуктор в своей плоскости вблизи оси создает синусоидально изменяющееся магнитное поле с амплитудой $0,070 \pm 0,002$ Тл, а стабилизирующая катушка с амплитудой $(2,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$ Тл.

Экспериментальным путем было установлено, что величина эрозии электродов составляет $1,2 \cdot 10^{-8}$ кг/Кл. Исходя из этого, по формуле Саха можно рассчитать электронную концентрацию в плазме кГц-диапазона. При расходе плазмообразующего газа 10^{-4} кг/с молярная доля ионов материала электрода будет в районе 10^{-3} . В таком случае при температуре 5000 К концентрация электронов составляет $2 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$, при 6000 К – $1 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$, при 7000 К – $3 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$. Полученные оценки хорошо согласуются с экспериментальными измерениями электронной концентрации с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии.

Список литературы

- [1] Ким В. П. Конструктивные признаки и особенности рабочих процессов в современных стационарных плазменных двигателях Морозова // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. Вып. 3. С. 45–59.
- [2] Попов В. Ф., Горин Ю. Н. Процессы и установки электронно-ионной технологии. М. : Высш. шк., 1988. 255 с.
- [3] Монтасер А., Голайтли Д. Индуктивно-связанная плазма в аналитической атомной спектроскопии. Нью-Йорк : VCH Publishers, 1992.
- [4] Capitelli M., Bardsley J. N. Nonequilibrium Processes in Partially Ionized Gases. Springer Science & Business Media, 2012, 695 p.
- [5] Smirnov V. M. Theory of Gas Discharge Plasma. Springer, 2014. 423 p.
- [6] Bruggeman P., Cunge G., Sadeghi N. Absolute OH density measurements by broadband UV absorption in diffuse atmospheric-pressure He–H $_2$ O RF glow discharges // Plasma Sources Science and Technology, 2012, vol. 21, no. 3, p. 035019.
- [7] Schutze A., Jeong J. Y., Babayan S. E., Jaeyoung P., Selwyn G. S., Hicks R. F. The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources // IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, vol. 26, no. 6, pp. 1685–1694.
- [8] Apollonov V. V. High-Energy Molecular Lasers: Self-Controlled Volume-Discharge Lasers and Applications. Springer, 2016, 440 p.
- [9] Sharma S., Sirse N., Kaw P. K., Turner M. M., Ellingboe A. R. Effect of driving frequency on the electron-sheath interaction and electron energy distribution function in a low pressure capacitively coupled plasmas // Physics of Plasmas, vol. 23, issue 11. doi: 10.1063/1.4967356

Нами была измерена сила, с которой поток газа давит на пластинку из молибдена без разряда и с разрядом на расстоянии 10^{-2} м от внешней плоскости кольцевого электрода. Измерения были проведены при атмосферном давлении окружающей разряд среды. Массовый расход плазмообразующего газа аргона и термоизолирующего газа воздуха: $(1,07 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$ кг/с и $(1,60 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$ кг/с соответственно. Сила газовой струи при этом – $(1,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$ Н, удельная тяга – $0,70 \pm 0,06$ м/с. Сила плазменного потока составила $0,024 \pm 0,003$ Н, удельная тяга – $92,3 \pm 0,1$ м/с.

Заключение

В работе показана возможность применения токов кГц-диапазона для разработки РПД, работающих при атмосферном давлении рабочей среды. В дальнейшем мы планируем провести исследования эффективности работы генераторов на метане и ацетилене при использовании воздуха и кислорода в качестве окислителей. Для этого будет проведена модернизация установки и изготовлен стенд, позволяющий проводить такого вида работы. Будут проведены работы по оценке возможности применения данного направления для РПД, работающих на органическом топливе при использовании кислорода и азотно-кислородной смеси, которые можно будет использовать для перемещения в воздухе. Также будет проведена модернизация установки с целью исследования возможности применения разрядов и магнитных полей кГц-диапазона для работы в открытом космосе и управления космическими аппаратами.

- [10] Чурилов Г. Н. Плазменный синтез фуллеренов // Приборы и техника эксперимента. 2000. № 1. С. 5–15.
- [11] Чурилов Г. Н. Способ синтеза фуллереновой смеси в плазме при атмосферном давлении. Пат. № 2320536 Российская Федерация, 2008. Бюл. № 9.
- [12] Чурилов Г. Н., Осипова И. В., Внукова Н. Г. Способ синтеза фуллереновой смеси в плазме при атмосферном давлении. Пат. № 2483020 Российская Федерация, 2013. Бюл. № 15.
- [13] Чурилов Г. Н., Внукова Н. Г. Способ синтеза эндодральных фуллеренов. Пат. № 2582697 Российская Федерация, 2016. Бюл. № 12.
- [14] Чурилов Г. Н. Источник света для спектрального анализа. Пат. № 2326353 Российская Федерация, 2008, Бюл. № 16.
- [15] Игнатъев Г. Ф., Чурилов Г. Н. Способ очистки проката. Пат. № 1715452 Российская Федерация, 1997.

ALTERNATIVE DIRECTION OF DEVELOPMENT OF ROCKET PLASMA ENGINES BASED ON kHz DISCHARGE IN AN ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD

G. N. Churilov^{1, 2}, K. A. Finnikov², N. S. Nikolaev^{1, 2}

¹Kirensky Institute of Physics SB RAS, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

The knowledge gained from a detailed study of the physics of gas discharge formed the basis for the development and manufacture of rocket plasma thrusters. The developers associated further progress in this direction, with an increase in the density of the reaction mass – plasma. However, an increase in the density of the gas in which the discharge takes place leads to the occurrence of ionization and overheating instabilities, which ultimately lead to contraction of discharge. This is the main obstacle to obtaining stable plasma flows at high pressure and the development of plasma engines on their basis. In this work, using the example of laboratory-produced plasma generator generators that solve specific national economic problems, we have shown the possibility of circumventing this problem by applying high-frequency arc discharge of alternating current. Experimental results are given for devices working at atmospheric pressure using as plasma-forming gas like argon, helium and air. There are presented results of investigation of plasmatron construction with combined magnetic and vortex stabilization. This design can be taken as a prototype of a rocket plasma engine using, for example, as propellant like air-methane and oxygen-methane mixtures.

Keywords: rocket plasma engines, plasma, alternating current, kilohertz range, plasma instabilities, arc discharges of atmospheric pressure.

References

- [1] Kim V. P. *Konstruktivnye priznaki i osobennosti rabochih processov v sovremennyh stacionarnykh plazmennyyh dvigatelyah Morozova* [Design features and operating procedures in advanced Morozov's stationary plasma thrusters] // Journal of Technical Physics, vol. 85, issue 3, pp. 45–59. (In Russian)
- [2] Popov V. F., Gorin Yu. N. *Processy i ustanovki ehlektronno-ionnoy tekhnologii* [Processes and installations of electron-ion technology]. Moscow, Higher. shk., 1988, 255 p. (In Russian)
- [3] Montaser A., Golightly D. W. *Induktivno-svyazannaya plazma v analiticheskoy atomnoj spektrometrii* [Inductively Coupled Plasmas in Analytical Atomic Spectrometry]. New York, VCH Publishers Inc., 1992. (In Russian)
- [4] Capitelli M., Bardsley J. N. *Nonequilibrium Processes in Partially Ionized Gases*. Springer Science & Business Media, 2012, 695 p.
- [5] Smirnov B. M. *Theory of Gas Discharge Plasma*. Springer, 2014, 423 p.
- [6] Bruggeman P., Cunge G., Sadeghi N. Absolute OH density measurements by broadband UV absorption in diffuse atmospheric-pressure He–H₂O RF glow discharges // Plasma Sources Science and Technology, 2012, vol. 21, no. 3, p. 035019.
- [7] Schutze A., Jeong J. Y., Babayan S. E., Jaeyoung P., Selwyn G. S., Hicks R. F. The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources // IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, vol. 26, no. 6, pp. 1685–1694.
- [8] Apollonov V. V. *High-Energy Molecular Lasers: Self-Controlled Volume-Discharge Lasers and Applications*. Springer, 2016, 440 p.
- [9] Sharma S., Sirse N., Kaw P. K., Turner M. M., Ellingboe A. R. Effect of driving frequency on the electron-sheath interaction and electron energy distribution function in a low pressure capacitively coupled plasmas // Physics of Plasmas, vol. 23, issue 11. doi: 10.1063/1.4967356.

- [10] Churilov G. N. *Plazmennyy sintez fullerenov* [Plasma synthesis of fullerenes] // Instruments and Experimental Technique, 2000, no. 1, pp. 5–15. (In Russian)
- [11] Churilov G. N. *Sposob sinteza fullerenovoy smesi v plazme pri atmosfernom davlenii* [Method for the synthesis of fullerene mixture in plasma at atmospheric pressure]. Patent RU 2320536, 2008, bulletin no. 9.
- [12] Churilov G. N., Osipova I. V., Vnukova N. G. *Sposob sinteza fullerenovoy smesi v plazme pri atmosfernom davlenii* [Method for the synthesis of fullerene mixture in plasma at atmospheric pressure]. Patent RU 2483020, 2013, bulletin no. 15.
- [13] Churilov G. N., Vnukova N. G. *Sposob sinteza ehndoehdral'nyh fullerenov* [Method for the synthesis of endohedral fullerenes]. Patent RU 2582697, 2016, bulletin no. 12.
- [14] Churilov G. N. *Istochnik sveta dlya spektral'nogo analiza* [Light source for spectral analysis]. Patent RU 2326353, 2008, bulletin no. 16.
- [15] Ignatiev G. F., Churilov G. N. *Sposob ochistki prokata* [Method of cleaning rolled]. Patent RU 1715452, 1997, bulletin no. 16.