

УДК 629.7.036

## ВЛИЯНИЕ РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ ОБСТАНОВКУ, СОЗДАВАЕМУЮ СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

© 2023 г. А. П. Плохих<sup>1</sup>, \*, Н. А. Важенин<sup>1</sup>, Д. В. Меркурьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики  
Московского авиационного института, Москва, Россия

\*riame@mai.ru

Поступила в редакцию 20.03.2023 г.

После доработки 29.03.2023 г.

Принята к публикации 02.04.2023 г.

Рассматриваются возможные аспекты нарушения функциональной безопасности космических аппаратов в части электромагнитной совместимости с электрическими ракетными двигателями при их работе на альтернативных рабочих веществах. Описана процедура экспериментального определения спектрально-временных характеристик собственного электромагнитного излучения лабораторного макета стационарного плазменного двигателя СПД-70 разработки Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института. Измерения помехоэмиссии проводились на вакуумной установке с “радиопрозрачным” отсеком и экранированной безэховой камерой в диапазоне частот 1...12 ГГц для типовых мощностей разряда (600, 800, 1000 Вт), вертикальной и горизонтальной поляризации и различных используемых рабочих веществ (криптон и ксенон). Проведенные исследования позволили получить новые сравнительные результаты оценки спектральных характеристик излучения СПД-70 для типовых режимов и перспективных рабочих тел в рамках ортогональных поляризационных базисов. К новым результатам следует отнести и сведения о характеристиках излучения СПД-70 во временной области. Показано, что переход с ксенона на криптон сохраняет импульсный характер излучения стационарного плазменного двигателя, приводя не только к увеличению амплитуды импульсов, но и к увеличению частоты повторения “пачек” и увеличению их длительности, что требует проведения дополнительных мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости с целью сохранения функциональной безопасности космического аппарата.

DOI: 10.31857/S0023420623700140, EDN: HJLCFG

### ВВЕДЕНИЕ

Общая проблема обеспечения безопасности космических полетов напрямую связана с решением таких задач как обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) на борту космических аппаратов (КА). Потенциальные потери из-за сбоев в аппаратуре и в электронных системах, связанных с внешней электромагнитной обстановкой, могут быть отнесены к категории нарушения функциональной безопасности [1, 2].

Несмотря на то что процедуры решения задач ЭМС для КА давно отработаны [3, 4], нельзя утверждать, что все они окончательно решены по причине того, что электромагнитная обстановка постоянно эволюционирует. Это связано как с изменением характеристик естественных источников радиоизлучений в космическом пространстве, так и с расширением функциональных возможностей штатной и полезной нагрузок КА, создающих дополнительные помеховые излучения.

В этом направлении следует отметить, что в настоящее время наблюдается бурное развитие малых космических аппаратов (МКА) и многоспутниковых группировок на их основе. Устанавливаются требования к обеспечению достаточно большого срока активного существования МКА при относительно небольшой стоимости разработки, изготовления и эксплуатации таких аппаратов, которые успешно удовлетворяются за счет использования электроракетных двигательных установок (ЭРДУ) в их составе [5]. При этом интеграция ЭРДУ с КА требует проведения широкого комплекса испытаний, который в настоящее время хорошо освоен [6–9].

С целью снижения затрат на эксплуатацию таких МКА наметилась тенденция перехода на более дешевые и доступные рабочие тела. Так, американская компания SpaceX при создании многоспутниковой группировки Starlink [10] использовала стационарные плазменные двигатели (СПД)



Рис. 1. Модель двигателя СПД-70.

на криптона вместо традиционного и более дорогого ксенона.

Такая замена газообразного рабочего вещества в СПД существенно меняет рабочие процессы в двигателе и требует их дополнительной оптимизации [11, 12]. В этой связи определенным интересом представляет оценка влияния рабочих веществ на электромагнитную обстановку, создаваемую стационарными плазменными двигателями.

Следует отметить, что одна из основных процедур ЭМС – оценка помехоэмиссии СПД в наземных условиях – представляется нетривиальной задачей, так как помимо создания условий космической среды по вакууму необходимо обеспечить отсутствие переотражений в измерительном объеме. Решению этой задачи ЭМС применительно к электрическим ракетным двигателям посвящены многочисленные работы [13–16].

В настоящей работе представлены результаты сравнительного исследования собственного излучения стационарного плазменного двигателя в спектральной и временной областях при работе на криптона и ксеноне с позиций обеспечения функциональной безопасности КА.

### МОДЕЛЬ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Исследование собственного электромагнитного излучения стационарного плазменного двигателя проводилось на созданной в Научно-исследовательском институте прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института экспериментальной модели двигателя СПД-70 с внешним диаметром ускорительного канала 70 мм.

Для снижения потерь ускоряющихся ионов на стенках разрядной камеры, выходная часть ускорительного канала была расширена с дополнительным перемещением в нее слоя ионизации и

ускорения. Топология магнитного поля на срезе двигателя и геометрия ускорительного канала были оптимизированы для работы на режимах с большей плотностью расхода, что необходимо при использовании криптона [11]. Внешний вид стационарного плазменного двигателя представлен на рис. 1.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Для измерения помехоэмиссии СПД использовался электровакуумный стенд, подробно описанный в публикациях [13, 17] (рис. 2).

Кратко отметим, что использовалась мобильная безэховая экранированная камера (БЭК) 1 с интегрированной в нее “радиопрозрачной” вакуумной камерой из стеклопластика 2. В рабочем положении “радиопрозрачная” вакуумная камера стыковалась с основной, образуя общий откачиваемый вакуумный объем. Внутреннее пространство БЭК облицовано абсорберами пирамидальной формы, выполненными из радиопоглощающего материала. Диапазон эффективной работы абсорберов от 0.3 до 18 ГГц и выше при коэффициенте безэховости не более –20 дБ. Измерительные антенны 17 размещались на диэлектрическом помосте 10, смонтированном внутри БЭК. Через панель с проходными разъемами они были соединены с измерительной аппаратурой 18, расположенной снаружи БЭК.

Двигатель СПД-70 устанавливался в радиопрозрачную вакуумную камеру, при этом ось двигателя совпадала с осью симметрии вакуумного объема.

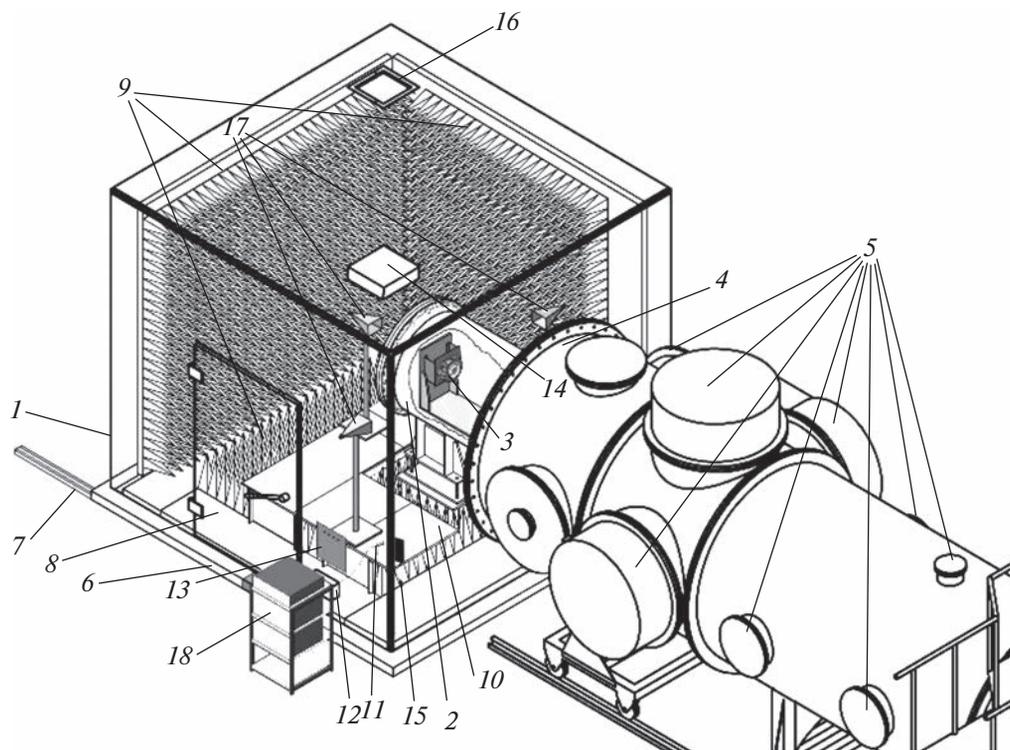
Применяемые измерительные средства аналогичны описанным в работе [17]. Использовалась рупорная измерительная антенна с рабочим диапазоном частот от 0.9 до 12.4 ГГц и линейной поляризацией. Угловое положение антенны составляло  $(90 \pm 5)^\circ$  относительно направления плазменной струи двигателя. Обеспечивалась возможность изменения плоскости поляризации антенны на  $90^\circ$ . Выход антенны подключался к анализатору спектра.

Испытания модели двигателя СПД-70 проводились для трех уровней мощности разряда – 600, 800 и 1000 Вт, при напряжении разряда 300 В и работе на ксеноне и криптона.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе работы двигателя регистрация его излучения осуществлялась двумя способами.

1. Анализатор спектра работал под управлением компьютера в режиме сканирования по частоте в диапазоне от 1000 до 12 000 МГц. Получаемые значения пересчитывались в напряженность электрического поля в апертуре измерительной



**Рис. 2.** Экспериментальный стенд. 1 – БЭК; 2 – радиопрозрачный цилиндр; 3 – ЭРД; 4 – основная вакуумная камера; 5 – система откачки; 6 – подвижная платформа; 7 – рельсовый путь; 8 – дверь; 9 – радиопоглощающее покрытие; 10 – диэлектрический помост; 11 – сетевой удлинитель; 12 – проходной сетевой фильтр; 13 – панель с проходными разъемами; 14 – реверсивный вентилятор; 15 – пульт управления вентилятором; 16 – дополнительное окно вентиляции; 17 – измерительные антенны; 18 – стойка с измерительным оборудованием.

антенны с учетом ее антенн-фактора и затухания в кабельной сети. Такой подход соответствует методике, описанной в публикации [17].

2. Анализатор спектра работал под управлением компьютера в режиме “Zero-Span” и оцифровывал квадратурные составляющие входного процесса в полосе анализа 140 МГц. Путем перестройки центральной частоты анализатора спектра с шагом 140 МГц были получены временные реализации амплитудной огибающей процесса на всех участках исследуемого диапазона частот, которые были пересчитаны в значения напряженности электрического поля в апертуре измерительной антенны.

Для первого способа результаты обработки приведены в виде графиков спектральных характеристик для вертикальной и горизонтальной поляризации (рис. 3), где по горизонтальной оси отложена частота от 1000 до 12000 МГц, по вертикальной – напряженность электрического поля в размерности децибел-микровольт на метр на мегагерц (дБмкВ/м/МГц). На всех графиках присутствует фоновый уровень излучения, соответствующий выключенному двигателю.

Проведенные измерения дают хорошее совпадение с результатами, описанными в работе [17].

Подтверждается, что двигатель СПД-70 имеет широкополосный спектр излучения, основная часть которого сосредоточена в полосе частот от 1 до 3 ГГц как для ксенона, так и для криптона, при этом для всех режимов работы и поляризаций фиксируются дополнительные спектральные составляющие на частотах в районе 10 ГГц.

Анализ поляризационных характеристик излучения показал, что для двух рабочих тел значительно доминирует излучение с горизонтальной поляризацией. Максимальное превышение уровня излучения при работе на криптоне по сравнению с ксеноном для модели СПД-70 составляет порядка 10 дБ в диапазоне частот от 1 до 2 ГГц для горизонтальной поляризации.

Для мощности разряда 600 Вт при работе на криптоне обнаружено возникновение дополнительных максимумов излучения в диапазоне 2...7 ГГц, которые пропадают с увеличением мощности разряда.

Обобщая результаты, можно констатировать, что перевод СПД-70 на криптон существенно повышает его уровень излучения в диапазоне частот 1...2 ГГц. Начиная с 3 ГГц, уровни излучения для двух рабочих тел становятся сопоставимыми с не-

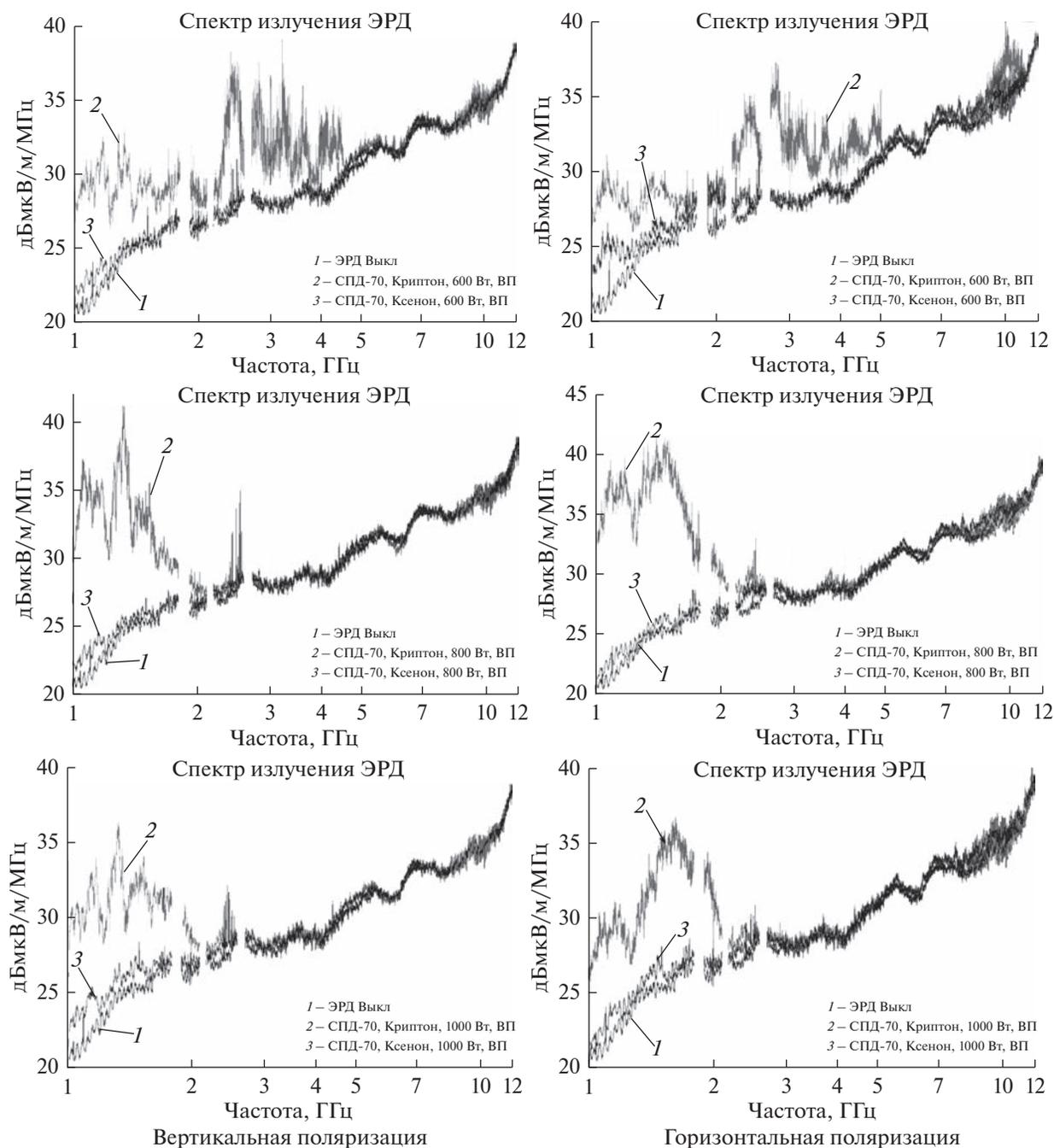


Рис. 3. Сравнение спектров излучения модели СПД-70 при работе на ксеноне и криптоне.

значительным превышением излучения при работе на ксеноне.

Второй способ регистрации позволил получить информацию о временной структуре излучения. На рис. 4, 5 приведены примеры реализации амплитудной огибающей излучения модели СПД-70 для вертикальной и горизонтальной поляризации при работе на ксеноне и криптоне (режим 600 Вт).

Анализ полученных временных реализаций показывает, что при работе на ксеноне и крипто-

не они представляют собой случайные последовательности импульсов, длительность и интервал следования которых зависят от частотных поддиапазонов и видов рабочих веществ. При этом на фоне последовательности случайных импульсов возникают квазипериодические группы импульсов увеличенной (более чем в два раза) амплитуды, образующие ярко выраженные “пачки”. Так, например, при использовании ксенона (режим 600 Вт, частота 1.05 ГГц, горизонтальная

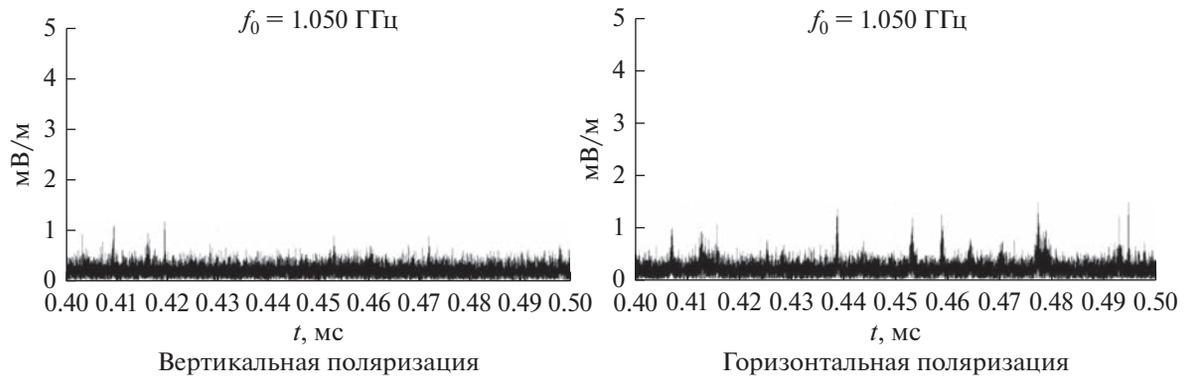


Рис. 4. Реализации амплитудной огибающей излучения модели СПД-70 при работе на ксеноне.  $f_0 = 1.050$  ГГц.

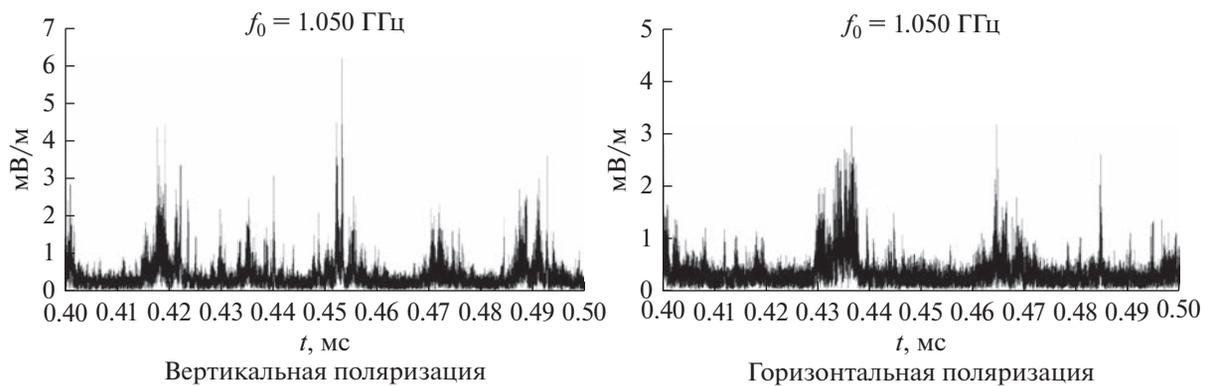


Рис. 5. Реализации амплитудной огибающей излучения модели СПД-70 при работе на криптоне.  $f_0 = 1.050$  ГГц.

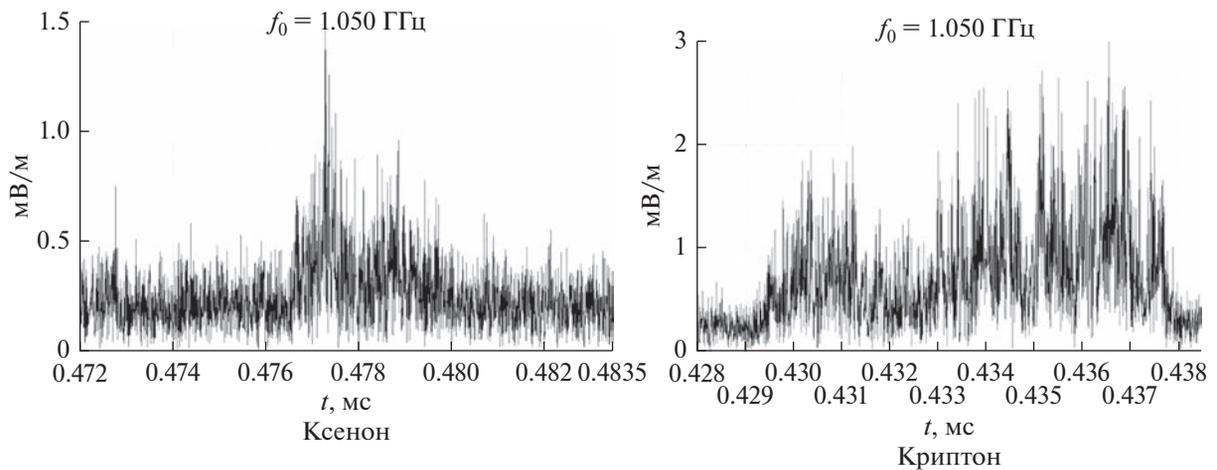
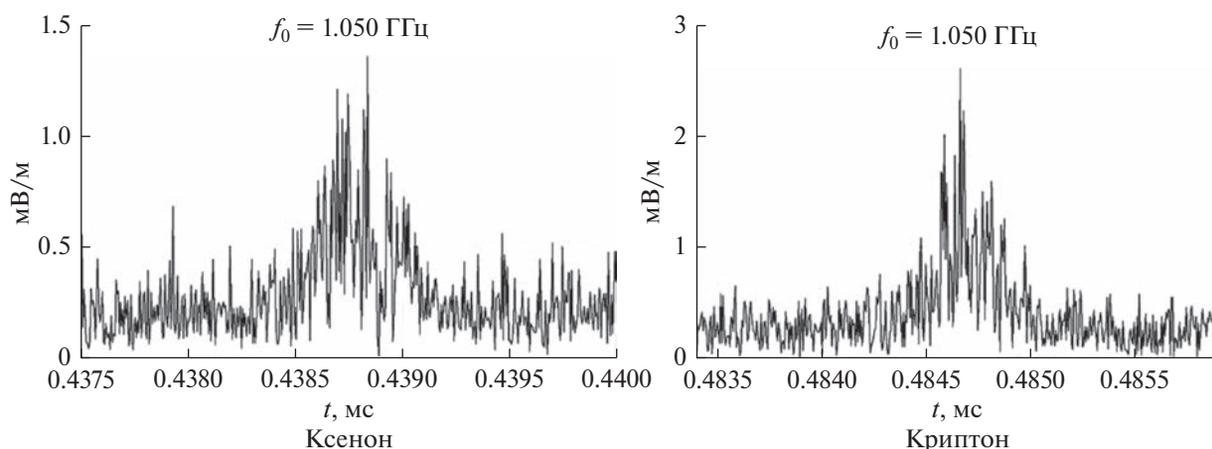


Рис. 6. Примеры амплитудных огибающих “пачек” импульсов излучения модели СПД-70 при работе на ксеноне и криптоне.  $f_0 = 1.050$  ГГц, мощность 600 Вт.

поляризация) средний интервал следования одиночных импульсов лежит в диапазоне 1...5 мкс, а интервал следования “пачек” составляет 6...10 мкс. При этом длительность “пачки” может достигать 3 мкс по уровню 0.5 (рис. 6, слева).

Переход на криптон для аналогичного режима незначительно увеличивает амплитуду основной последовательности импульсов, сохраняя их интервал следования. При этом растет амплитуда “пачек”, число которых увеличивается. В результа-



**Рис. 7.** Примеры амплитудных огибающих одиночных импульсов излучения модели СПД-70 при работе на ксеноне и криптоне.  $f_0 = 1.050$  ГГц, мощность 600 Вт.

те интервал следования “пачек” сокращается до 2...4 мкс, а их длительность может увеличиваться за счет взаимного перекрытия, достигая 10 мкс (рис. 6, справа).

Что касается длительности одиночных импульсов, то для сравнения на рис. 7 представлены огибающие одиночных импульсов для различных рабочих веществ и горизонтальной поляризации.

Как видно из рисунка, при переходе от ксенона к криптому увеличивается амплитуда импульсов. Что касается средней длительности, то в этом примере она слабо зависит от вида рабочего вещества и при измерении по уровню 0.5 лежит в диапазоне от 0.15 до 0.25 мкс. Для получения более точных оценок параметров импульсов необходима дополнительная статистическая обработка по всем ансамблям реализаций в исследованных диапазонах частот.

Как видно из представленных результатов, излучение СПД-70 представляет собой широкополосное излучение сложной импульсной природы, параметры которого существенно зависят от вида рабочего вещества.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

Перевод СПД-70 с ксенона на криптон существенно повышает его уровень излучения в диапазоне частот 1...2 ГГц. Начиная с 3 ГГц, уровни излучения для двух рабочих тел становятся сопоставимыми с незначительным превышением уровня излучения при работе на ксеноне. Для двух рабочих тел зарегистрировано максимальное превышение уровня излучения для криптона порядка 10 дБ для горизонтальной поляризации.

Для режима разряда 600 Вт при работе на криптоме обнаружено возникновение дополнительных максимумов излучения в диапазоне 2...7 ГГц, которые пропадают с увеличением мощности разряда.

Зарегистрирован импульсный характер излучения модели СПД-70 во временной области, представляющий собой случайную последовательность импульсов, длительность и интервал следования которых зависят от частотных поддиапазонов и видов рабочих веществ. В выявленных случайных последовательностях присутствуют группы импульсов увеличенной амплитуды, образующие “пачки”, следующие с квазипериодическим интервалом повторения.

Показано, что переход с ксенона на криптон может приводить не только к увеличению амплитуды импульсов, но и к увеличению частоты повторения “пачек” и увеличению их длительности, что требует дополнительного статистического исследования.

Таким образом, смена рабочего вещества существенно меняет электромагнитную обстановку, создаваемую стационарным плазменным двигателем (для случая одинаковых режимов), что требует проведения дополнительных мероприятий по обеспечению ЭМС с целью сохранения функциональной безопасности КА.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smith D.J., Simpson K.G.L.* Functional Safety: A Straightforward Guide to IEC61508 and Related Standards. 1st ed. L.: Butterworth-Heinemann, 2001. 263 p.
2. *Smith D.J., Simpson K.G.L.* The Safety Critical Systems Handbook: A Straightforward Guide to Functional Safety: IEC 61508 (2010 Edition), IEC 61511 (2016 Edition) and Related Guidance. 5th ed. L.: Butterworth-Heinemann, 2020. 360 p.

3. *Fortescue P., Swinerd G., Stark J.* Spacecraft Systems Engineering. 4th ed. John Wiley and Sons Limited, 2011. 728 p.
4. *Nikitina V.F., Smirnova N.N., Smirnova M.N. et al.* On-board electronic devices safety subject to high frequency electromagnetic radiation effects // *Acta Astronautica*. 2017. V. 135. P. 181–186.  
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.09.012>
5. *Ахметжанов Р.В., Бозатый А.В., Дьяконов Г.А. и др.* Электрические ракетные двигатели нового поколения для малых космических аппаратов // *Изв. Российской акад. наук. Энергетика*. 2019. № 3. С. 3–13.  
<https://doi.org/10.1134/S0002331019030038>
6. *Kuge J., Bodin P., Persson S., Rathsmann P.* Accommodating electric propulsion on SMART-1 // *Acta Astronautica*. 2004. V. 55. Iss. 2. P. 121–130.  
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2004.04.003>
7. *Krejcia D., Seiferta B., Scharlemann C.* Endurance testing of a pulsed plasma thruster for nanosatellites // *Acta Astronautica*. 2013. V. 91. P. 187–193.  
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.06.012>
8. *Yu Qin, Kan Xie, Ning Guo, Zun Zhang et al.* The analysis of high amplitude of potential oscillations near the hollow cathode of ion thruster // *Acta Astronautica*. 2017. V. 134. P. 265–277.  
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.02.012>
9. *Shuai Cao, Xuan Wang, Junxue Ren et al.* Performance and plume evolutions during the lifetime test of a Hall-effect thruster // *Acta Astronautica*. 2020. V. 170. P. 509–520.  
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.12.036>
10. *Pelton J.N., Madry S.* Handbook of Small Satellites: Technology, Design, Manufacture, Applications, Economics and Regulation. Springer, 2020. 1702 p.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-36308-6>
11. *Kim V., Zakharchenko V., Merkurev D. et al.* Influence of Xenon and Krypton Flow Rates through the Acceleration Channel of Morozov's Stationary Plasma Thruster on the Thrust Efficiency // *Plasma Physical Reports*. 2019. V. 45. Iss. 1. P. 11–20.  
<https://doi.org/10.1134/S1063780X19010082>
12. *Kim V., Merkurev D., Shilov E. et al.* Study of the low-power krypton-operated stationary plasma thruster plume // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. V. 927. 13th Intern. Conf. Applied Mathematics and Mechanics in the Aerospace Industry (AMMAI'2020). 6–13 Sept. 2020, Alushta, Russia. 2020. Art. ID. 012053.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/927/1/012053>
13. *Плохих А.П., Важеннин Н.А., Попов Г.А.* Анализ влияния электромагнитного излучения стационарных плазменных двигателей на помехоустойчивость канала связи “Земля – космический аппарат” // *Косм. исслед.* 2019. Т. 57. № 5. С. 339–346. (*Cosmic Research*. 2019. V. 57. Iss. 5. P. 317–324.)  
<https://doi.org/10.1134/S0023420619050078>
14. *Beiting E., Pollard J., Khayms V. et al.* Electromagnetic Emissions to 60 GHz from a BPT4000 EDM Hall Thruster // *Intern. Electric Propulsion Conf. Toulouse France*. 17–21 March 2003. Art. ID. IEPC-03-129. P. 17–21.
15. *Beiting E., Eapen X., Pollard J. et al.* Electromagnetic Emissions from PPS®1350 Hall Thruster // *31st Intern. Electric Propulsion Conf.* 20–24 Sept. 2009, Ann Arbor, USA. Art. ID. IEPC-2009-071. 13 p.
16. *Ciarallia S., Colettib M., Gabriela S.B.* Results of the qualification test campaign of a Pulsed Plasma Thruster for Cubesat Propulsion (PPTCUP) // *Acta Astronautica*. 2016. V. 121. P. 314–322.  
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.08.016>
17. *Плохих А.П., Важеннин Н.А., Попов Г.А., Шилов С.О.* Спектральные характеристики собственного излучения электрических ракетных двигателей с замкнутым дрейфом электронов в радиодиапазоне для различных рабочих тел // *Косм. исслед.* 2022. Т. 60. № 5. С. 396–403.  
<https://doi.org/10.31857/S0023420622050065>