

УДК 546.29 : 530.145

СРАВНЕНИЕ КСЕНОНА И КРИПТОНА В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА ДВИГАТЕЛЯ НА ЭФФЕКТЕ ХОЛЛА

© Шестов Н.С., Толстопятов М.И.

*Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Российская Федерация*

e-mail: shestov_98@bk.ru

Двигатель на эффекте Холла, возможно, является самой успешной технологией электрических двигателей по количеству запущенных единиц в космос. В 1971 году Советский Союз совершил запуск первого стационарного плазменного двигателя СПД-60 на КА «Метеор-1-10». В период с 1971 по 2018 годы более 300 холловских двигателей использовались в различных миссиях, большинство из которых было произведено опытным конструкторским бюро «Факел».

Запуски двигателей на эффекте Холла значительно ускорились в 2019 году, с запуском 120 КА SpaceX Starlink и 6 OneWeb, каждый из которых включает двигатель Холла. К концу ноября 2020 года на низкую околоземную орбиту с помощью ДУ на эффекте Холла, были выведены еще 833 спутников SpaceX и 68 спутников OneWeb.

По ряду технических причин ксенон является предпочтительным топливом для двигателей на эффекте Холла. Основные технические причины включают его высокую массу (131 а.е.м.) и относительно низкий потенциал ионизации (12,1 эВ). Кроме того, инертная природа ксенона устраняет проблемы безопасности, которые мешали ранним усилиям электростатической тяги, когда ртуть и цезий были выбраны в качестве топлива. Ксенон – благородный газ, также он является самым массовым, и из-за его неидеального поведения газа можно создавать давление и хранить его при определенных плотностях, превышающих единство. Таким образом, он может храниться при более высокой плотности, чем обычный жидкий монотопливный гидразин [1; 2].

Криптон имеет меньшую атомную массу (83,8 а.е.м.) и более высокий потенциал ионизации (14,0 эВ), чем у ксенона. Однако, как и ксенон, криптон является благородным газом и может быть легко интегрирован в существующие системы управления ксеноновым топливом без особых изменений. Небольшая разница в потенциалах ионизации вряд ли сильно повлияет на эффективность двигателя Холла, а меньшая масса приведет к увеличению удельного импульса на 25 % при условии отсутствия компенсации убытков.

Применение криптона вместо ксенона обуславливается экономическим фактором. Криптон примерно в 10 раз чаще встречается в атмосфере (и, следовательно, в производстве), чем ксенон, а с учетом массы примерно в 6 раз дешевле. Один недостаток криптона состоит в том, что его доля резервуара, по-видимому, значительно выше, чем у ксенона. Сравнение физических свойств и стоимости ксенона и криптона приведены в таблице.

Доля сжатого газа в резервуарах может достигать 37 %. Как минимум в одном исследовании, посвященном этому вопросу, обнаружилось, что криоохладители, рассчитанные на космическое пространство, которые могут сжижать криптон (температура кипения 120 К) или ксенон (точка кипения 165 К), позволяют уменьшить долю резервуара на 2 %.

Экспериментальные исследования часто показывают, что тяговая эффективность с криптоновым топливом уступает ксенону [1]. Однако для СПД-100, работающем на эффекте Холла, мощностью 50 кВт, аналогичная тяговая эффективность была достигнута с использованием криптонового топлива.

Таблица. Сравнение физических свойств и стоимости ксенона и криптона [2]

Рабочее тело	Xe	Kr
Атомная масса, а.е.м.	131,3	83,8
Состояние	Газ	Газ
1-я энергии ионизации, эВ	12,13	14
2-я энергии ионизации, эВ	20,97	24,36
Стабильные изотопы	9	6
Температура плавления, К	161,4	115,8
Температура кипения, К	165,1	119,7
Критическая температура, К	289,7	209,5
Давление, МПа	5,84	5,5
Плотность, г/см ³	0,0059	0,0037
Стоимость (за 100 г), \$	120	33

В российских исследованиях изучается использование смеси криптона и ксенона для двигателей СПД с целью достичь компромисса в производительности по цене дешевле, чем чистый ксенон или чистый криптон. Эта смесь ксенона и криптона является побочным продуктом производства жидкого кислорода и стоит в 15 раз меньше, чем чистый ксенон, и в 2–3 раза меньше чистого криптона. Его использование показало многообещающие результаты на СПД-100 и СПД-140.

Был испытан широкий диапазон рабочих условий криптона, охватывающий диапазон мощности от 0,8 до 3,9 кВт, для летной модели СПД-100. Производительность подруливающего устройства была значительно ниже, по сравнению с работой на ксеноне. Удельный импульс работы криптона не был существенно выше ксенона, что не делает криптон практичным выбором для экономии массы топлива. Несоответствие эффективности криптона во многом объясняется его более низкой долей использования топлива, что неудивительно, потому что геометрия ускорительного канала (УК) была оптимизирована для ксенона.

КПД двигателя на криптоне был примерно на 8 % ниже, чем для ксенона при номинальном рабочем состоянии, но можно увеличить криптоновый КПД двигателя, что составляет около 50 % в условиях более высокой мощности. Однако повышенная рабочая мощность, необходимая для повышения производительности, может привести к сокращению срока службы. Если в будущем цены на ксенон резко вырастут, криптон все еще может быть реальной альтернативой топливу для СПД-100.

Несмотря на снижение производительности, криптон все еще может выполнить требования к содержанию станции для определенных миссий.

Библиографический список

1. Michael R. Nakles, William A. Hargus Jr., Jorge J. Delgado, Ronald L. Corey. A Performance Comparison of Xenon and Krypton Propellant on an SPT-100 Hall Thruster // IEPC-2011-003, Presented at the 32nd International Electric Propulsion Conference, Weisbaden, Germany September 11–15, 2011.
2. William A. Hargus, Jr., Gregory M. Azarnia, Michael R. Nakles. A Comparison of Ion Acceleration Characteristics for Krypton and Xenon Propellants within a 600 Watt Hall Effect Thruster // AIAA 2012-3871, 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit 30 July – 01 August 2012.