



УДК 629.7.036.74

А. И. Зараковский, А. В. Румянцев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗООБРАЗНОГО ЙОДА В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА ДЛЯ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

66

Обоснована целесообразность использования йода в качестве рабочего тела в стационарных плазменных ракетных двигателях. Это составляет альтернативу ксенону, который ввиду ряда недостатков не может применяться в двигателях высокой мощности для космических аппаратов.

The expediency of using iodine as the working fluid in the stationary plasma rocket engines is performed. The use of iodine is alternative for xenon, which due to a number of shortcomings can not be used in the engines of high power for spacecraft.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, йод, ксенон, рабочее тело.

Key words: stationary plasma thruster, iodine, xenon, propellant.

В настоящее время в ракетно-космической отрасли широко применяются плазменные ускорители с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения, или стационарные плазменные двигатели (СПД). Конструктивная схема СПД была разработана А.И. Морозовым в начале 1960-х гг. Дальнейшее развитие и усовершенствование конструкции СПД проводится в ОКБ «Факел». Именно высококвалифицированными конструкторами и испытателями ОКБ были созданы первые образцы СПД, которые успешно прошли испытания в составе спутника «Метеор» в открытом космосе в 1971 г. Начиная с середины 1990-х гг. двигатели схемы Морозова чрезвычайно востребованы.

В качестве рабочего тела в СПД в основном используется ксенон. Выбор ксенона обоснован рядом причин: он обладает довольно низкой энергией ионизации (12,1 эВ) и большой атомной массой (131,3 а. е. м.), а также стабильностью и инертностью, что позволяет сжимать его до нужных давлений и хранить при нормальных условиях. Кроме перечисленных достоинств ксенон также обладает и недостатками, которые не позволяют использовать его в двигателях высокой мощности. Первый из них — высокая стоимость: 5 дол. США за стандартный литр (850 дол. США за килограмм). Соответственно, для обеспечения ресурса работы двигателя в 10 000 часов затраты на ксенон составят 47 млн дол. Вторым основным недостатком ксенона является необходимость наземных испытаний. Чтобы поддержать давление 5×10^{-6} мм рт. ст. в ва-



куумной камере, используют криогенные вакуумные насосы, производительность которых должна быть на уровне 40 млн л в секунду для двигателя мощностью 500 кВт. Так, стоимость 1 л откачиваемого ксенона в секунду составляет 1 дол. США, в итоге следует затратить 40 млн дол. США на откачивание ксенона. Кроме того, нужно обеспечить всю инфраструктуру стенда.

Для долгосрочных полетов и транспортировки большой массы полезной нагрузки необходимо значительное количество рабочего тела на борту космического аппарата (КА). Ксенон добывается как субпродукт фракционной дистилляции атмосферных газов для использования в первую очередь сталелитейной промышленностью. Из-за низкой концентрации в атмосфере (~ 90 мг/т) во всем мире производится примерно 6 000 м³ ксенона в год.

Таким образом, несмотря на большую летную историю и наземные испытания двигателей на ксеноне, необходимо использовать альтернативные рабочие тела, например йод.

Масса атома йода – 126,9 а. е. м., но как галоген в естественном состоянии представляет собой двухатомную молекулу I₂ с атомной массой 253,8 а. е. м., для которой энергия диссоциации равна 1,57 эВ. Атомарный йод имеет энергию ионизации 10,45 эВ. Потенциал ионизации ниже, чем у ксенона, но поперечное сечение ионизации электронным ударом больше. Плотность йода составляет 4,9 г/см³ при комнатной температуре (в твердом состоянии). Йод имеет относительно высокое давление парообразования при низких температурах. Давление паров в 100 Па достигается при температуре 39 °С. В дополнение йод в 100 раз дешевле ксенона и широко распространен в природе. Ксенон и йод сравниваются в таблице.

Сравнение ксенона и йода

Элемент	Йод (I)	Ксенон (Xe)
Атомная масса	126,9	131,3
<i>Ионизационные свойства (для одноатомных)</i>		
Первый потенциал ионизации, эВ	10,45	12,10
Максимальное эффективное сечение (×10 ⁻¹⁶ см ²)	6,0	4,8
<i>Физические свойства</i>		
Плотность хранения при нормальных условиях, г/см ³	4,9	1,6*
Температура плавления, °С	113,7	- 112,0
Температура кипения при 10 Па, °С	9	- 181

* При давлении 14 МПа.

Йод хранится в твердом состоянии при очень низких давлениях. При нагревании до ~113 °С при атмосферном давлении йод сублимирует, а при охлаждении пары йода кристаллизуются, минуя жидкое состояние. Расход йода может регулироваться термодросселированием.



При нагреве до температуры не более 100 °С образуется пар йода I₂ с давлением ≤ 50 мм рт. ст. (рис. 1). При нагревании до 183 °С получим пар с давлением в 1 атм. Однако йод токсичен и имеет высокую химическую активность при взаимодействии с органическими смесями. Пары йода при охлаждении конденсируются, поэтому при конструировании системы подачи рабочего тела необходимо учесть подогрев ее элементов для поддержания температуры в диапазоне 80–100 °С.

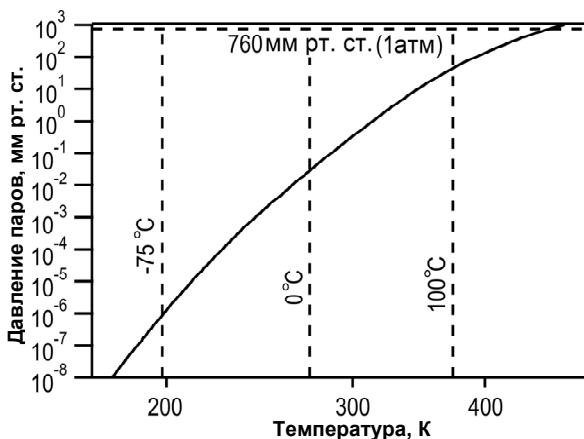


Рис. 1. Кривая давления паров для молекулярного йода (I₂)

Также в СПД необходимо обеспечить предварительный нагрев анода-газораспределителя во время подготовки двигателя к огневой работе. Ионизация происходит путем неупругого рассеяния высокоэнергетических электронов от нейтрального газа. На рисунках 2 и 3 представлены эффективные сечения ионизации.

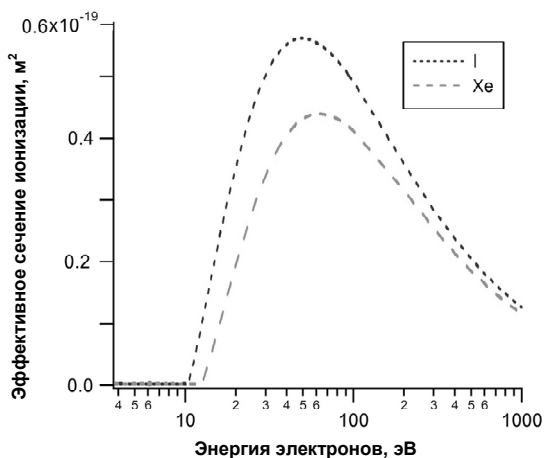


Рис. 2. Эффективное сечение ионизации электронным ударом для йода и ксенона

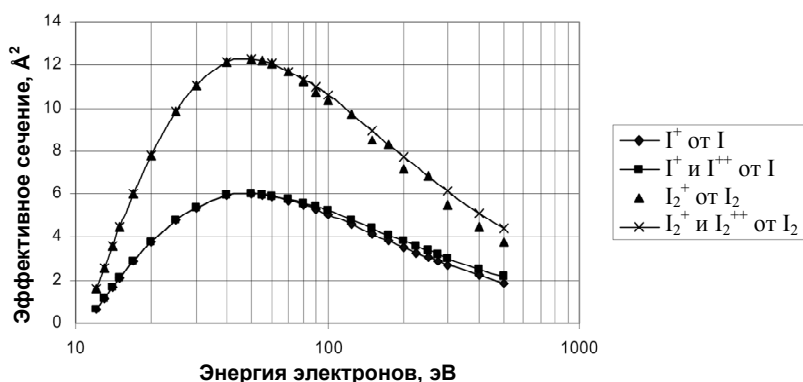


Рис. 3. Эффективное сечение ионизации йода

Эффективное сечение ионизации соответствует вероятности ионизации атома. Ясно, что вероятность ионизации йода намного больше, чем у ксенона, при энергиях электронов в диапазоне 10–200 эВ. Это означает, что для установленного режима мощности двигателя большая часть йода будет ионизована.

Йод может ионизоваться как двухатомная молекула с атомной массой около 254 а. е. м. Процесс ионизации двухатомного йода не будет происходить при полной ионизации, но вероятность его высока по сравнению с процессом диссоциации. Для ионизации двухатомного йода I_2 необходимо только 9,4 эВ, тогда как 10,4 эВ требуется для ионизации одноатомного йода I. При этом в расчет не берется, что для процесса диссоциации, происходящего при неупругом рассеянии, требуется энергия, равная 1,57 эВ, что на порядок меньше температуры электронов в разряде (~ 20–30 эВ).

Если учитывать процесс диссоциации, тогда случай ионизации только одноатомного йода меньше вероятен, чем случай ионизации только двухатомного йода. Экспериментальные исследования процессов ионизации должны показать увеличение в тяге, исключив теоретический случай ионизации только одноатомного йода, потому что смесь двухатомного и одноатомного йода будет иметь атомную массу выше, чем однородная смесь атомарного йода.

Также при использовании йода могут возникнуть проблемы в работе двигателя. Йод — один из тех галогенов, которым свойственно образовывать отрицательные ионы. Электрическая отрицательность объясняется процессом захвата электрона одноатомной или двухатомной молекулой йода. Энергия, необходимая для захвата электрона йодом, составляет 2,5 эВ для двухатомной и 3,0 эВ для одноатомной молекулы. Указанные значения энергий сравнимы с энергиями ионизации. Представим, что большая часть йода в плазме действительно захватывает электроны и происходит процесс образования отрицательных ионов. Отрицательные ионы будут двигаться в силовом электрическом поле в том же направлении, что и электроны, — внутрь двигателя. Отрица-



тельные ионы, имеющие большую массу (т. е. с большим радиусом Лармора) по сравнению с электронами, не будут вовлечены в вихревое движение вокруг силовых линий магнитного поля, как электроны.

Таким образом, отрицательные ионы устремятся в направлении анода, где, по всей вероятности, они перейдут в исходное состояние. Безусловно, это будет неприемлемо для работы двигателя. Однако электроны движутся с энергией большей, чем энергия столкновений, которая будет способствовать процессу образования отрицательных ионов. Скорее всего, данные электроны имеют слишком много энергии, чтобы быть захваченными. Йод способен захватить только электроны с малыми энергиями, что приводит к низкой вероятности процесса отрицательной ионизации. Необходимо экспериментально проверить, какие именно процессы в разряде доминируют. Столкновения с перезарядкой ионов также бывают. Они производят практический вклад в пучок ионов, где частицы имеют большую длину свободного пробега.

Как уже было сказано, в основном в процессе ионизации принимает участие двухатомная молекула I_2 с большой атомной массой, что ухудшает значения удельного импульса, но увеличивает показания цены тяги. Следовательно, это приведет к увеличению КПД.

Таким образом, можно сделать заключение:

- параметры йода близки к ксенону, и это позволит использовать штатную конструкцию СПД с незначительными изменениями;
- такие особенности йода, как конденсация паров при уменьшении температуры, способствуют изменению конструкции блока газораспределения для йода с применением нагревателей для поддержания необходимого газообразного состояния;
- йод в отличие от ксенона более распространен в природе и имеет небольшую стоимость. При применении йода удешевляются стендовые испытания;
- йод имеет улучшенные тяговые характеристики по сравнению с ксеноном.

Список литературы

1. C. Hillier A. C., Branam R. D., Huffman R. E. et al. Thrust Density Propellants in Hall Thrusters // AIAA 2011-5240. Florida, USA. 2011. P. 1–15.
2. Kieckhafer A., King L. B. Energetics of Propellant Options for High-Power Hall Thrusters // Proceedings of the Space Nuclear Conference, paper 1092. California, USA. 2005. P. 1–10.
3. Ali M., Kim Y. Ionization cross sections by electron impact on halogen atoms, diatomic halogen and hydrogen halide molecules // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2008. Vol. 41. P. 145202.
4. Kurt A., Polzin, Peoples S. Iodine Hall Thruster Propellant Feed System for a CubeSat // American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2014. P. 1–10.

Об авторах

Альберт Владимирович Румянцев — канд. физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: albert37@list.ru



Андрей Игоревич Зараковский – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, инженер-конструктор, ФГУП ОКБ «Факел», Калининград.
E-mail: drongo_90_90@mail.ru

About the authors

Dr Albert Rumyantsev, Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: albert37@list.ru

Andrey Zarakovskiy, PhD student, I. Kant Baltic Federal University, design engineer, EDB “Fakel”, Kaliningrad.
E-mail: drongo_90_90@mail.ru