

04;10

## Об одном критерии подобия плазменных ускорителей типа СПД

© А.И. Бугрова, А.С. Липатов, А.И. Морозов, Д.В. Чурбанов

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)

Поступило в Редакцию 21 марта 2002 г.

Рассмотрена работа стационарного плазменного ускорителя АТОН на различных рабочих газах. С помощью критерия подобия выбран оптимальный режим работы ускорителя на криптоне. Приведены сравнительные интегральные параметры ускорителя, работающего на криптоне и ксеноне.

Как известно, физические процессы в стационарном плазменном двигателе (СПД) определяются тремя фундаментальными характеристиками рабочего процесса — это:

безразмерный коэффициент потери приложенного напряжения

$$1 - \chi \equiv 1 - \frac{\Delta U}{U_p},$$

где  $\Delta U$  — затраты энергии на ионизацию и различные потери; величину  $\Delta U$  можно сопоставить со средним потенциалом зоны ионизации;  $U_p$  — разрядное напряжение;

коэффициент использования рабочего тела

$$\mu = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}} = J_i/J_m,$$

где  $J_i$  — ток ионов, выходящий из канала, отвечает за эффективную степень ионизации;  $J_m$  — массовый ток, равный  $\frac{e}{M} \dot{m}$ , где  $e$  — заряд электрона,  $M$  — масса атома,  $\dot{m}$  — расход рабочего вещества;

параметр обмена  $\xi = J_p/J_m$  характеризует эффективность протекания тока в канале, здесь  $J_p$  — разрядный ток.

Знание безразмерных параметров  $\chi$ ,  $\mu$ ,  $\xi$  позволяет найти набор интегральных характеристик ускорителя. Так развивается тяга

$$F = \sqrt{\frac{2e}{M}} \mu \dot{m} \cdot \sqrt{U_p(1 - \chi)},$$

потребляемая мощность

$$W = J_p U_p = \xi J_{in} U_p$$

и т.д. Эти обобщенные характеристики были построены в [1–2] с использованием параметра подобия  $\alpha$ , зависящего от ширины канала и удельного расхода. Показано, что при одном и том же рабочем веществе — ксеноне, но при различных расходах, ускоритель работает в одинаковых с точки зрения  $\chi$ ,  $\mu$ ,  $\xi$  режимах при одинаковых значениях:

$$\alpha \geq \frac{\dot{m}}{S} b \sim 2 \cdot 10^{-2} \text{ mg/s} \cdot \text{mm}, \quad (1)$$

$S$  — площадь выходной зоны канала,  $b$  — ширина канала.

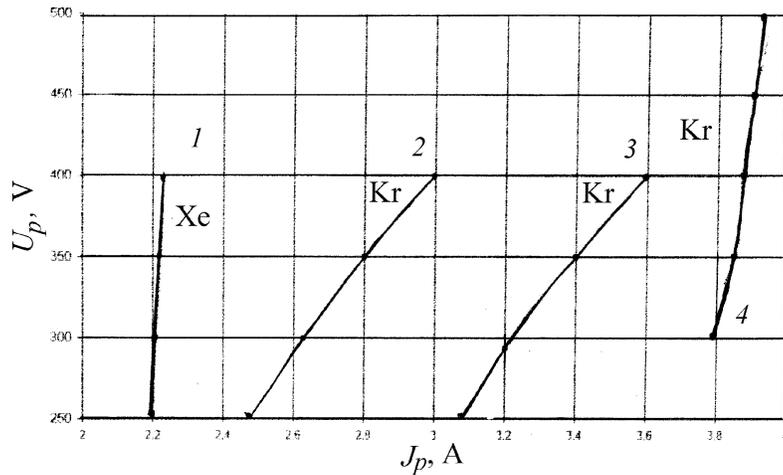
Однако в последнее время большое значение придается работе двигателя на различных рабочих веществах, в том числе Kr, N<sub>2</sub> и т.д. Это связано с дорогой ценой Xe и потребностью в длительных полетах к планетам и астероидам. Связь между  $\alpha$ -минимально необходимым расходом, обеспечивающим оптимальный режим работы двигателя, и сортом рабочего вещества, полученная в тех же работах, имеет вид

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\Lambda_*}} \left( \frac{\varepsilon T_0}{\beta^2} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\Lambda_* = \Lambda \delta$ ,  $\Lambda$  — длина ионизации  $\lambda_{ion}/L$ , где  $L$  — длина канала,  $\delta = \frac{\varepsilon}{eU_p}$ ,  $\varepsilon$  — цена иона, близкая к величине  $\Delta U$ ;  $T_0$  — температура атомов рабочего газа на входе в канал СПД,  $\beta = \langle \sigma v \rangle_{ion}$ . Однако это выражение неудобно использовать. Поэтому придадим ему ясный физический смысл и форму, удобную для практического использования. Действительно, заменив  $\alpha$ , согласно (1), в (2) получаем

$$\left( \frac{\dot{m}}{S} b \right)^2 = \frac{eU_p}{\beta^2} T_0 = \text{const}, \quad (3)$$

т.е. двигатели одинаковых размеров будут работать в одинаковых с точки зрения  $\chi$ ,  $\mu$ ,  $\xi$  режимах, при одинаковых значениях расходов различных рабочих веществ. Очевидно, что этот вывод справедлив с точностью до  $\beta$ . Поскольку зависимость  $\beta$  от свойств субстанции слабая (сюда накладывается и неточное знание ФРЭ электронов, и



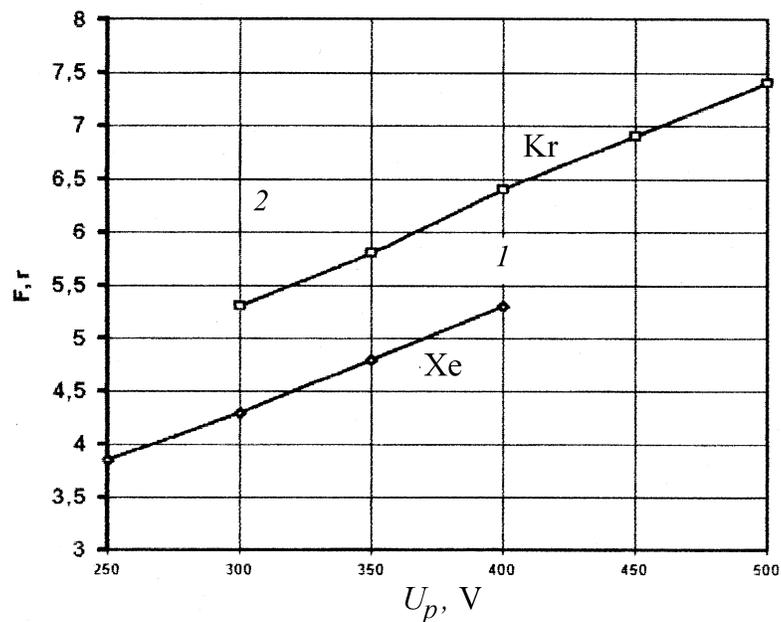
**Рис. 1.** Вольт-амперные характеристики СПД при работе на Хе (1) и Кг (2–4): 1, 4 —  $\dot{m} = 2.3$  mg/s, 2 —  $\dot{m} = 1.5$  mg/s, 3 —  $\dot{m} = 2$  mg/s.

ее динамика в канале двигателя, и неточность в определении  $\sigma$ ), то вывод о постоянстве расхода для двигателей одинаковых размеров, но работающих на различных рабочих телах, является справедливым с точностью до множителя (1 ÷ 2).

Проверка полученного вывода была проведена на двигателе СПД-АТОН [3]. Эксперимент проводился на модели А-3, внутренний диаметр внешнего изолятора составлял  $\varnothing = 60$  mm, длина канала равнялась 24 mm, а ширина зазора составляла  $b = 12$  mm. Эксперимент проводился в диапазоне вкладываемой мощности  $W = 0.5 \div 1.5$  kW. Рабочим веществом служил Хе и Кг.

#### *Анализ экспериментальных результатов*

*Вольт-амперные характеристики.* На рис. 1 приведены статические ВАХ-модели на Хе и Кг, полученные в оптимальном по магнитному полю режиме работы системы. Из рисунка видно, что в диапазоне напряжений  $250 \leq U_p \leq 400$  V величина тока практически не зависит от напряжения, что говорит о высокой степени ионизации рабочего вещества. Чем меньше расход Кг через анод, тем более пологими стано-



**Рис. 2.** Зависимость тяги от разрядного напряжения при работе на Хе (1) и Kr (2),  $m = 2.3 \text{ mg/s}$ .

вятся характеристики и ускоритель работает менее эффективно. Для Хе в этой области напряжений разрядный ток превосходит массовый, что объясняется наличием „сквозного“ электронного тока и наличием двухзарядных ионов (10–12%) [4]. При использовании Kr в качестве рабочего тела доля двухкратных ионов, как показывает эксперимент, мала, сечение ионизации меньше, чем у Хе, поэтому уменьшение отношения ( $J_m/J_p$ ) у Kr по сравнению с Хе кажется разумным.

*Тяговые характеристики.* На рис. 2 приведена зависимость тяги от напряжения для обоих рабочих веществ (Хе и Kr). Видно, что зависимости идентичны. Аппроксимация полученных зависимостей формулой (1) позволяет определить  $\Delta U$ .

Для Хе эта величина составляет  $\sim 40 \text{ V}$ , для Kr —  $60 \text{ V}$ . Как для Хе, так и для Kr это составляет примерно четыре потенциала ионизации.

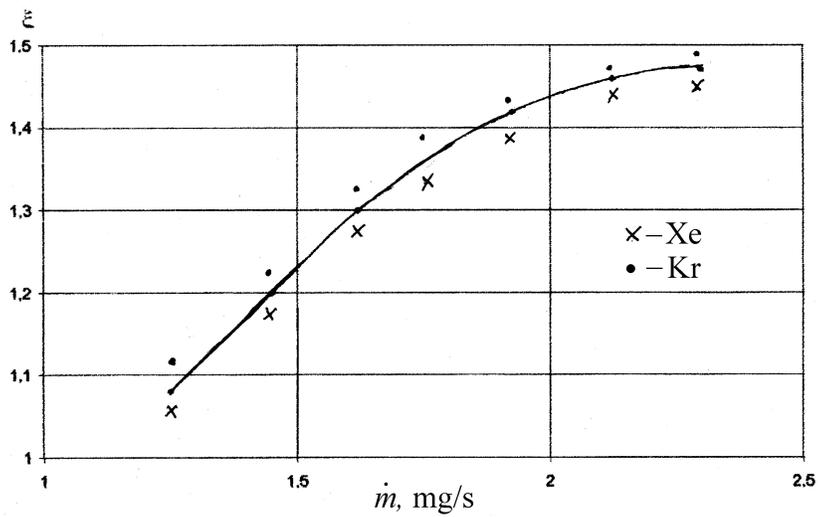


Рис. 3. Зависимость параметра обмена  $\xi$  от расхода газа: Kr, Xe.

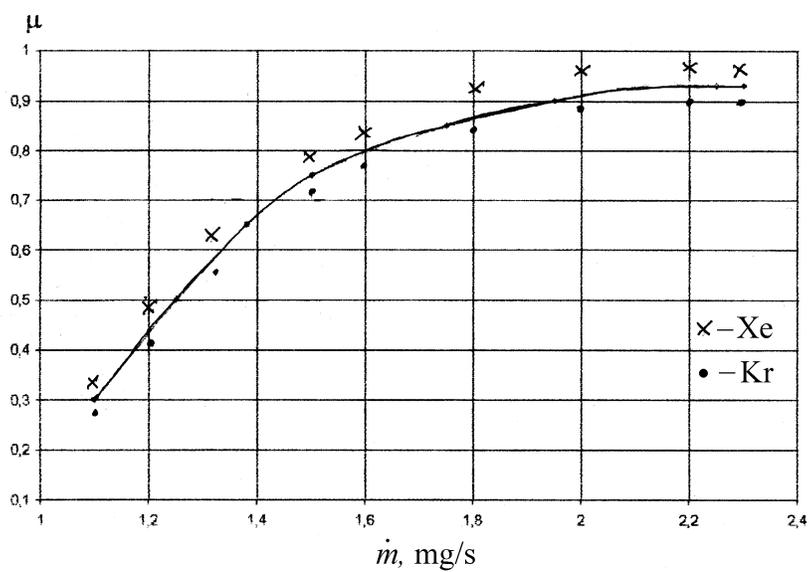


Рис. 4. Зависимость  $\mu$  от расхода газа: Kr, Xe.

Параметр обмена  $\xi$ .  $\xi = J_p/J_{\dot{m}}$  от расхода для Кг и Хе приведены на рис. 3. Из рисунка видно, что в пределах точности для обоих газов зависимость  $\xi$  от  $\dot{m}$  совпадает.

Коэффициент использования рабочего вещества  $\mu$ . Зависимость коэффициента использования рабочего вещества  $\mu = J_i/J_{\dot{m}}$ , отвечающего за эффективную степень ионизации от  $\dot{m}$ , приведена на рис. 4. Как видно из рисунка, с увеличением расхода рабочего тела он выходит на насыщение. В пределах точности его значения для Хе и Кг совпадают.

#### **Заключение**

1. Подтверждена справедливость критериальных зависимостей, полученных и исследованных для Хе при работе двигателя на Кг.

2. Показано, что при различных рабочих веществах ускоритель работает в одинаковых (с точки зрения  $\xi$ ,  $\mu$ ,  $\Delta U$ ) режимах при одинаковых значениях  $\alpha \equiv \frac{\dot{m}}{S} b \sim 2 \cdot 10^{-2} \text{ mg/s} \cdot \text{mm}$ .

Работа выполнена в рамках INTAS-99-1225.

#### **Список литературы**

- [1] Морозов А.И., Меликов И.В. // ЖТФ. 1974. Т. 44. В. 3. С. 544.
- [2] Бугрова А.И., Масленников Н.А., Морозов А.И. // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 6. С. 45.
- [3] Морозов А.И., Бугрова А.И., Десятков А.В. и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 7. С. 587.
- [4] Ермаков Ю.А. и др. // ЈЕРС-96-68. 1995.