

04

© 1991 г.

ЗАКОНЫ ПОДОБИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В УЗДП*А. И. Бугрова, Н. А. Масленников, А. И. Морозов*

Проведено исследование интегральных зависимостей между выходными и входными параметрами в УЗДП разных размеров. Получены безразмерные критерии подобия, учитывающие сорт рабочего вещества, режим работы и размеры экспериментальных моделей.

Введение

В основной массе работ по УЗДП фигурируют абсолютные значения локальных и интегральных величин: разрядный ток J_p , измеренный в А; напряжение на электродах u_p , измеренное в В; расход рабочего тела \dot{m} , измеренный в г/с; и т. д. Это обстоятельство не только приводит к определенному дублированию работ, но и не дает возможности установить физические связи между параметрами УЗДП. Чтобы их выявить, необходимо перейти к формированию соотношений в безразмерных величинах. Безразмерные параметры, насколько нам известно, впервые применительно к УЗДП использовались в работах [1, 2]. В качестве такого параметра была введена безразмерная длина ионизации

$$\Lambda = \lambda_{\text{ион}}/L.$$

Здесь $\lambda_{\text{ион}}$ — длина пробега нейтрала до ионизации, L — длина канала. Этот критерий был неоднократно полукачественно проверен на моделях близких размеров с точки зрения выхода УЗДП на оптимальный режим работы при разных рабочих телах. Однако до последнего времени не было проведено исследование интегральных зависимостей между выходными и входными параметрами (\dot{m} , u_p) как в одном УЗДП, так и в УЗДП разных размеров с точки зрения законов подобия.

В работе [3] проведено обобщение интегральных характеристик УЗДП, полученных в определенном диапазоне входных параметров (\dot{m} и u_p) на ускорителях с разными геометрическими размерами ускорительного канала — наружным радиусом r и шириной канала b .

Эти обобщенные зависимости были построены при использовании в качестве аргументов ширины канала b и удельного расхода рабочего тела $\bar{m} = \dot{m}/S = \dot{m}/(2\pi r b)$, где S — сечение ускорительного канала.¹

В данной работе поставлена задача найти законы подобия основных интегральных характеристик УЗДП, полученных при изучении серии УЗДП, отличающихся геометрическими размерами, и связь их с параметрами подобия, введенными в [1].

В качестве таких интегральных характеристик нас будут интересовать средние скорости истечения v , коэффициент использованной массы μ , параметр обмена ξ в рабочем режиме, когда рабочая точка лежит на «вертикальной» ветви ВАХ.

¹ В работе [3] величины b и \bar{m} обезразмерены, но это обезразмеривание выполнено достаточно случайным образом, поэтому здесь мы его использовать не будем.

Исходный экспериментальный материал был получен при работе на Хе на моделях с характерными размерами, приведенными в таблице, при магнитных полях, соответствующих минимальному разрядному току (при заданных \dot{m} и u_p).

Модель УЗДП	S , мм ²	b , мм	Модель УЗДП	S , мм ²	b , мм
P-50	$1.25 \cdot 10^3$	10	P-130	$1.22 \cdot 10^4$	30
P-70	$2.59 \cdot 10^3$	15	P-200	$1.52 \cdot 10^4$	20
P-100	$5 \cdot 10^3$	20			

Анализ экспериментальных данных

Рассмотрим три фундаментальные характеристики рабочего процесса в УЗДП.

Средняя скорость истечения. Экспериментальные данные для средней скорости ионов удобно аппроксимировать зависимостью

$$v = \sqrt{\frac{2eu_p}{M}} \sqrt{1 - \frac{\Delta u}{u_p}} = \sqrt{\frac{2eu_p}{M}} \sqrt{1 - x},$$

где $1 - x \equiv 1 - (\Delta u / u_p)$ — безразмерный коэффициент использования приложенного напряжения, Δu — затраты энергии на ионизацию и различные потери.

Зависимости $\Delta u = f(\dot{m}, b, r)$ для разных моделей представлены на рис. 1.

Коэффициент использования рабочего тела. $\mu = \dot{m}_i / \dot{m} = J_i / J_m$, где J_i — ток ионов, выходящий из канала, от

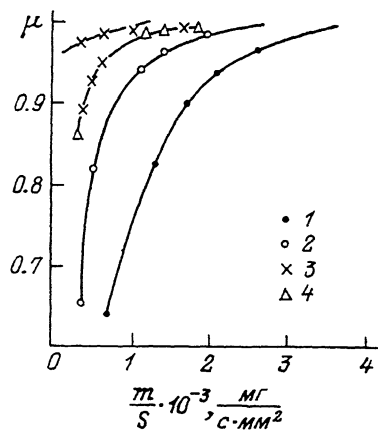
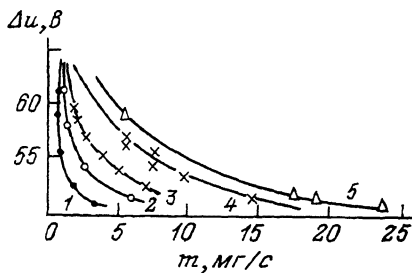


Рис. 1. Зависимость затрат энергии на ионизацию и потери для различных моделей УЗДП от расхода рабочего газа.

1 — P-50, 2 — P-70, 3 — P-100, 4 — P-130, 5 — P-200.

Рис. 2. Изменение коэффициента использования рабочего газа от удельного расхода для различных моделей УЗДП.

1 — P-50, 2 — P-70, 3 — P-100, 4 — P-130, 5 — P-200.

вечает за эффективную степень ионизации. На рис. 2 показано его изменение в зависимости от удельного расхода, ширины канала и радиуса модели.

Параметр обмена $\xi = J_p / J_m$. Изменения параметра обмена в зависимости от размеров модели представлены на рис. 3.

Знание безразмерных параметров x , μ , ξ позволяет найти целый набор характеристик ускорителя. Так, развиваемая им тяга

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

потребляемая мощность

$$N = J_p \cdot u_p = \xi \cdot \dot{m} u_p.$$

Наша задача будет состоять в том, чтобы найти минимальное число параметров, в идеале один (α), с тем, чтобы все указанные зависимости, приведенные на рис. 1—3, свести с минимальным разбросом к трем функциям α , μ (α), ξ (α).

Учитывая результаты работы [3], в качестве величины возьмем комплекс $\bar{m} \cdot b^k$

$$\alpha \equiv \frac{\bar{m}}{2\pi r b} \cdot b^k$$

и попробуем выбрать k , при котором разброс для всех трех зависимостей одновременно будет минимальным. На рис. 4, $a—e$ представлены зависимости Δu (α),

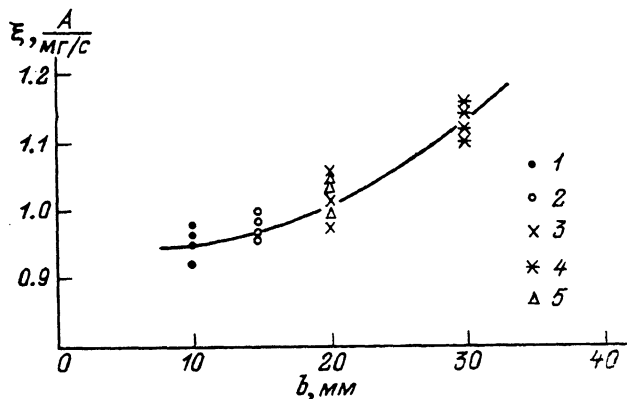


Рис. 3. Изменение параметра обмена в зависимости от размеров модели.

1 — P-50, 2 — P-70, 3 — P-100, 4 — P-130, 5 — P-200.

μ (α), ξ (α) при различных значениях k . Отсюда видно, что наиболее адекватным всем трем зависимостям является $k=1$. Хотя, конечно, нельзя априори утверждать, что указанные три зависимости должны зависеть только от одного аргумента, но наша попытка свести все к одному оказывается достаточно успешной и в общем лежит в пределах ошибки определения отдельных величин.

При $k=1$ параметр α реально определяется только полным расходом \bar{m} и радиусом канала r

$$\alpha = \frac{\bar{m}}{2\pi r} \quad (1)$$

и не зависит от b . В общем этот результат представляется достаточно естественным, поскольку не видно явных механизмов влияния полной длины холловского тока $2\pi r$ на характеристики ускорителя. Впрочем, как видно из графиков рис. 1, при изменении b/r в широких пределах можно добиться лучшего согласия аппроксимирующих зависимостей с точками, если вместо α взять величину

$$\bar{\alpha} = \alpha \left[1 + \theta \left(\frac{b}{r} \right)^2 \right].$$

Здесь $\theta = \text{const}$ различная для разных моделей.

Как видно из приведенных графиков, модели выходят на оптимальный режим работы при

$$\alpha_{\text{кр}} \geq 2 \cdot 10^{-2} \text{ мг/мм} \cdot \text{с}.$$

Используя графики рис. 4, $a—e$, можно подобрать аппроксимационные зависимости для рассматриваемых величин. «Потеря напряжения» Δu аппроксимируется формулой

$$\Delta u = a_0 + a_1/\alpha, \quad (2)$$

где $a_0 \approx 50$ В, $a_1 \approx 7 \cdot 10^{-2}$ В · мг/мм · с для Хе. Но для Хе величина 50 В близка к цене иона ε . Поэтому можно написать

$$\Delta u \approx \varepsilon + a_1/\alpha. \quad (3)$$

Если ввести безразмерную цену иона δ

$$\delta = \frac{\varepsilon}{eu_p}, \quad (4)$$

то (3) можно записать в последовательно безразмерном виде

$$x \equiv \frac{\Delta u}{u_p} = \delta \left(1 + \frac{a_1^*}{a} \right), \quad a_1^* = a_1/\varepsilon. \quad (5)$$

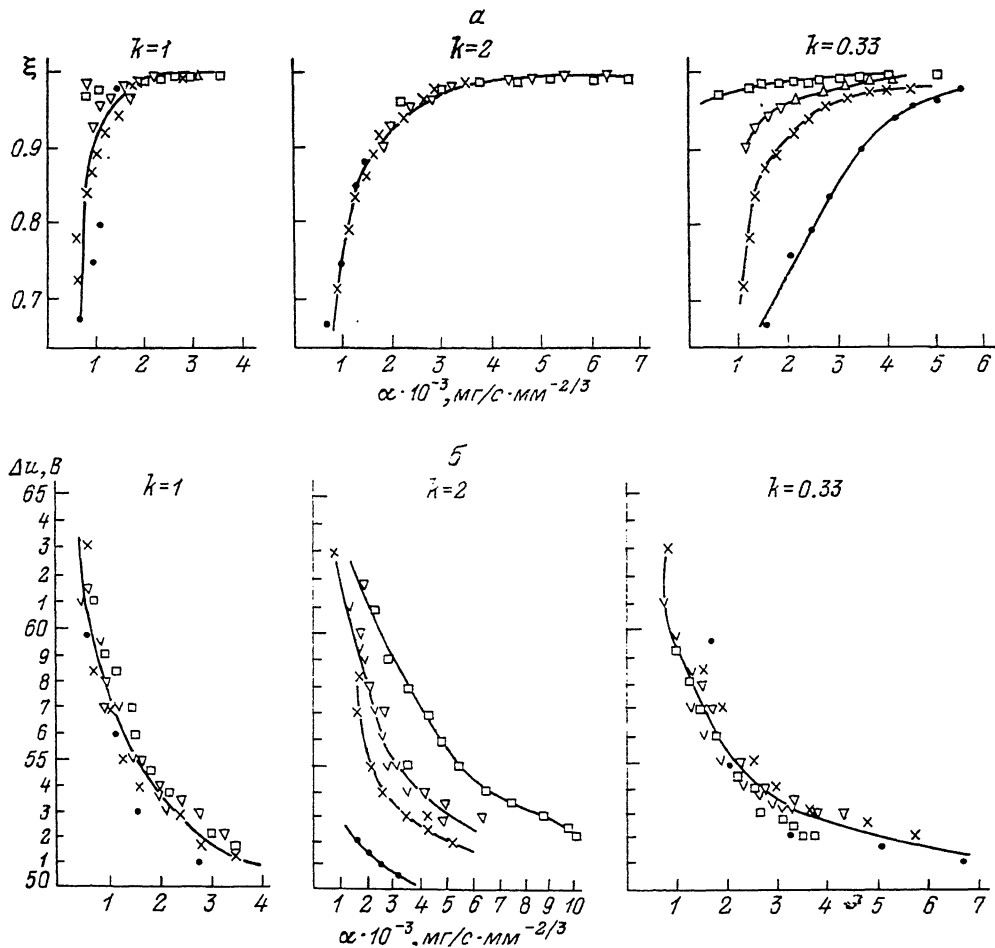


Рис. 4. Зависимость величин Δu , μ , ξ от параметра α при разных значениях k .

Для коэффициента использования массы $\mu = J_i/J_m$ в качестве аппроксимации можно взять выражение

$$\mu = 1 - e^{-a_2 \alpha}. \quad (6)$$

Здесь $a_2 = 3 \cdot 10^2 (\text{mg/s} \cdot \text{mm})^{-1}$. Экспоненциальная зависимость разумно коррелирует с закономерностями процесса ионизации. Параметр обмена может быть представлен формулой

$$\xi = a_3 + a_4 \cdot \alpha^2, \quad (7)$$

где $a_3 = 0.9 \text{ А/мг/с}$, $a_4 = 2.5 \cdot 10^{+2} (\text{с} \cdot \text{мм/мг})^2 \cdot (\text{А/мг/с})$.

Связь параметров α и Λ

Параметр подобия α , найденный в результате обработки экспериментальных данных, естественно попытаться связать с введенными ранее в [1] безразмерными параметрами подобия. Аналогами числа Фруда

$$\gamma = \frac{M v_0^{*2}}{e u_p} \quad (8a)$$

и числа Кнудсена

$$\zeta = \frac{v_0^*}{\beta n_0 L}. \quad (86)$$

Здесь $\beta \equiv \langle \sigma v_e \rangle_{\text{ион}}$, n_0 , v_0^* — параметры потока на входе в канал; L — длина канала. Параметры (8) были введены при анализе процессов в УЗДП в одномер-

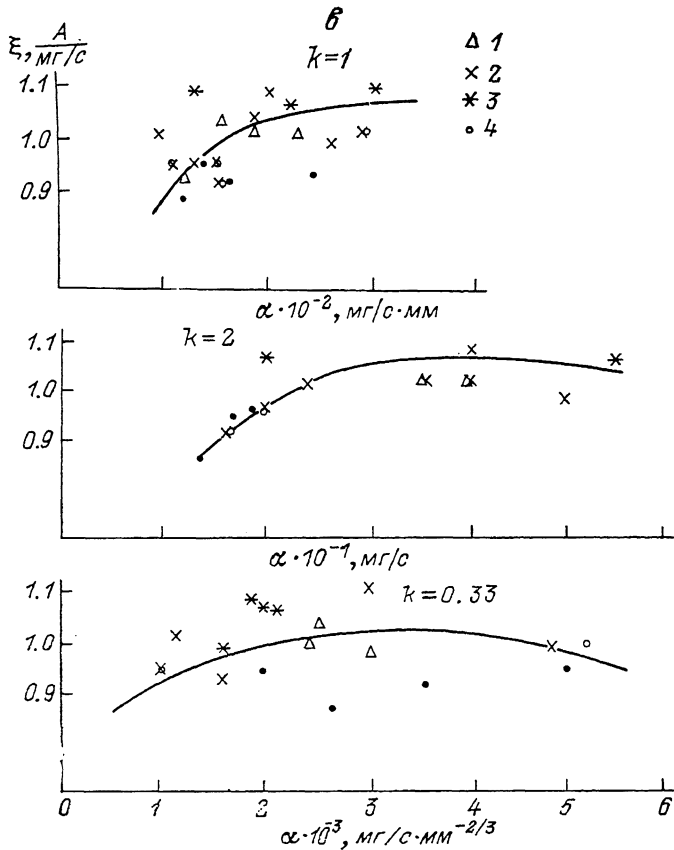


Рис. 4 (продолжение).

ном приближении в рамках системы двух уравнений, описывающих динамику ионной и нейтральной компонент. Третья компонента (электронная) в работе учитывалась путем задания $E(x)$ и коэффициента ионизации (через $T_e(x)$). Очевидно, что последовательный учет электронной компоненты приведет по крайней мере к еще одному безразмерному параметру

$$\delta = \epsilon / e u_p$$

(ϵ — цена ионизации), о котором уже шла речь выше (4).

Если найденный нами параметр α является универсальным, то его следует попытаться выразить как комбинацию безразмерных параметров γ , ζ , δ .

В работе [1] был введен весьма эффективный безразмерный параметр, который назовем параметром Меликова—Морозова,

$$\Lambda = \zeta^2 / \gamma = \frac{e E_0 v_0^{*2}}{M \beta q_0^2 L} = \frac{\lambda_{\text{ион}}}{L}, \quad q_0 \equiv n_0 v_0^*, \quad (9)$$

равный относительной длине ионизации. Этот параметр можно записать в виде

$$\Lambda = \frac{2 e u_p (v_0^{*2} \cdot M/2)}{M^2 \beta q_0^2 L^2}, \quad u_p = E L. \quad (10)$$

Если учесть, что $\alpha = q_0 b M$, то (9) можно записать в виде

$$\Lambda = \frac{eu_p \cdot kT_0^*}{\beta_0^2 \alpha^2} \cdot \frac{b^2}{L^2}. \quad (11)$$

Здесь $kT_0^* \equiv Mv_0^{*2}/2$ — тепловая энергия нейтральных частиц на входе; L имеет смысл длины канала, где имеется «существенная» напряженность электрического поля, тогда как b имеет смысл ширины канала.

Однако реально различие между этими величинами не существенно, если учесть, что основное падение потенциала приходится на зоны понижения и ускорения, которые в сумме имеют порядок ширины канала ($L \approx b$).² Таким образом, из (11) находим связь α и Λ

$$\alpha \approx \frac{1}{\sqrt{\Lambda}} \left(\frac{eu_p \cdot kT_0^*}{\beta^2} \right)^{1/2}. \quad (12)$$

Известным недостатком выражения (12) является то, что в него входит явно разрядное напряжение. Чтобы от него избавиться, введен вместо параметра Λ , даваемого формулой (10), новый параметр

$$\Lambda_* = \Lambda \delta = \frac{\varepsilon (Mv_0^{*2})}{M^2 \beta_0^2 q^2 L^2}, \quad (13)$$

который явно не зависит от u_p , а зависит только от индивидуальных свойств вещества и расхода. В реальных условиях Λ и Λ_* — не очень сильно различающиеся численно величины, и, по-видимому, переходя от Λ к Λ_* , мы не изменим вывод [1, 2] о связи минимального необходимого расхода \dot{m}_{\min} с сортом рабочего вещества. Но в таком случае мы получаем

$$\alpha \approx \frac{1}{\sqrt{\Lambda_*}} \left(\frac{\varepsilon \cdot kT_0^*}{\beta^2} \right)^{1/2}.$$

Если подставить сюда $\varepsilon = 40$ эВ, $kT_0^* = 0.03$ эВ, $\beta = 10^{-8}$ см⁻³/с, то получим $\alpha \approx 0.15/\sqrt{\Lambda_*}$ мг/см, что неплохо согласуется при $\Lambda_* = 1$ с α^* для ксенона.

Заключение

В работе получены критериальные зависимости для ряда выходных параметров УЗДП различных размеров при работе на различных рабочих веществах. Конечно, это рассмотрение далеко не исчерпывает проблему, так как в нем не учтены влияние стенок, двумерный характер процессов, немаксвелловский характер ФРЭ и т. д. Тем не менее полученные результаты можно сформулировать следующим образом.

1. При работе на одном и том же рабочем веществе — ксеноне, но при различных расходах ускоритель работает в одинаковых (с точки зрения α , μ , ξ) режимах при одинаковых значениях

$$\alpha \equiv \frac{\dot{m}}{S} b \sim 2 \cdot 10^{-2} \text{ мг/с} \cdot \text{мм},$$

которые выходят на насыщение при

$$\alpha^* > \alpha = 2 \cdot 10^{-2} \text{ мг/с} \cdot \text{мм}.$$

2. Теоретически параметр α можно связать с параметром Мелкова—Морозова

$$\alpha \equiv \frac{eu_p kT_0^*}{\beta^2 \alpha^2}$$

с заменой $L \rightarrow b$ [1, 2].

² Это объясняется конфигурацией магнитного поля в УЗДП с «узкими полюсами».

3. Хорошо оправдывающая себя зависимость от сорта рабочего вещества ($x = \text{const}$), очевидно, работает и здесь, мы имеем критерий, который учитывает изменение m , b , S .

В заключение авторы выражают благодарность И. В. Меликову за интерес к работе и полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Морозов А. И. // ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 3. С. 544—547.
- [2] Меликов И. В. // ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 3. С. 549—555.
- [3] Масленников Н. А. Ионно-плазменные устройства в технике. Харьков, 1989. С. 17—19.

Поступило в Редакцию
9 августа 1989 г.
В окончательной редакции
29 января 1990 г.

