

С 345
П-198

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

А.С. Пасюк

7 - 3409

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ С ПОДОГРЕВНЫМ
КАТОДОМ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель -
член-корреспондент АН СССР

Г.Н. Флеров

Дубна, 1967

7 - 3409

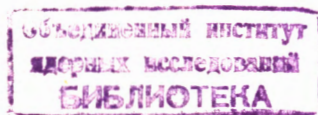
А.С. Пасюк

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ С ПОДОГРЕВНЫМ
КАТОДОМ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель -
член-корреспондент АН СССР

Г.Н. Флеров



В в е д е н и е

Прошло немногим более десяти лет с тех пор, как физики-экспериментаторы стали уделять серьезное внимание ядерным реакциям, производимым многозарядными ионами (м.з.и.). Ускоренные до больших энергий (~ 10 мэв/нуклон) тяжелые ионы позволяют значительно расширить экспериментальные возможности ядерной физики (изучение кулоновского возбуждения, реакции передачи при касательных столкновениях, получение изотопов с недостатком нейтронов, получение трансурановых элементов и др. /10/). В настоящее время ускорение многозарядных ионов до больших энергий осуществляется в основном на циклотронах и линейных ускорителях.

Первоначально на циклотронах многозарядные ионы ускорялись на "субгармонике" с последующей обдиркой на остаточном газе и дальнейшим ускорением на основной частоте. Поскольку в этом случае место зарождения высокозарядных ионов рассредоточено по всему пути ускорения их, то и энергетический спектр таких ионов широк. Такие пучки ионов неудобны для проведения большинства экспериментов. Моноэнергетический пучок ионов в циклотроне может быть получен при образовании ускоряемых ионов с необходимым зарядом непосредственно в ионном источнике.

Для получения трансурановых элементов и проведения других экспериментов, связанных с взаимодействием многозарядных ионов с ядрами, в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) построен трехметровый циклотрон У-300^{/11,12/}, рассчитанный на ускорение ионов, имеющих $A/Z = 3,5-7$ (A и Z — соответственно атомный вес и заряд иона). Так, для ускорения на этом циклотроне ионов неона ($A = 20$ и 22), кремния ($A = 28$), серы ($A = 32$), хлора ($A = 35$ и 37), аргона ($A = 40$) до энергий, достаточных, чтобы преодолеть

кулоновский барьер ядра из тяжелой мишени (~ 6 Мэв/кулон), необходимо иметь заряд иона от 4 до 8 электронных единиц. При проведении большинства экспериментов величины необходимых средних токов ионов на конечном радиусе должны колебаться от десятых долей микроампера до десятков микроампер. С учетом потерь при ускорении необходимо было разработать источник, который смог бы выдать нужные ионы в достаточных количествах. Так, на конечном радиусе токи таких ионов как C^{4+} , N^{5+} , O^{6+} , Ne^{4+} должны составлять несколько десятков микроампер, а токи таких ионов как S^{7+} , Ar^{7+} , Ar^{8+} , Ce^{9+} - несколько микроампер. Срок службы источника должен быть не менее 20-25 часов.

В настоящее время интерес физиков, занимающихся реакциями с многозарядными ионами, направлен к еще более тяжелым ионам, находящимся во второй половине таблицы Менделеева, вплоть до урана. Реакции с такими ионами дают возможность получения ядер с зарядом 114 и 126, где предполагается наличие относительно долгоживущих изотопов.

Для того чтобы ускорить такие ионы на циклотроне до энергий 5-6 Мэв/кулон, необходимо увеличить или радиус магнитных полюсов R , или напряженность магнитного поля H , или заряд иона Z , так как энергия частицы пропорциональна $R^2 H^2 Z^2$. В связи с этим при проектировании ускорителей необходимо знать возможности существующих источников для получения многозарядных ионов таких элементов как Ce , Kr , Mo , Xe , W и др., так как стоимость циклотронного ускорителя растет примерно пропорционально $R^{2,5}$.

Темой данной работы является исследование источников многозарядных ионов с целью увеличения интенсивности более легких ионов и выяснения возможности получения тяжелых ионов (вторая половина таблицы Менделеева).

При проектировании источника для ускорителей многозарядных ионов ОИЯИ за основу был принят источник с подогреваемым катодом 137 , разработанный Б.Н. Маковым и др., как наиболее перспективный из всех известных к началу работы.

В диссертации излагаются результаты исследования источника подобного типа как на стенде, так и на циклотронах. На основе полученных данных и характеристик источников многозарядных ионов, изменения режима питания источника и некоторых конструктивных изменений его удалось получить на циклотронах большие интенсивности пучков различных ионов (см. табл. 3). При стендовых испытаниях источников получены интенсивные пучки сверх-

тяжелых многозарядных ионов, величина которых превосходит более чем $\frac{V}{10}$ раз значение токов, полученных из источника с холодными катодами (см. табл. 4).

1. а) Скорость ионообразования и сечение ионизации

1. В дуговых ионных источниках ионизация газа в основном осуществляется электронным ударом. Скорость ионизации равна ^{/22/}

$$R = \frac{N_0 v_N}{4} P(j_0), \quad (1)$$

где $\frac{N_0 v_N}{4}$ — поток нейтральных частиц через столб дуги;

$P(j_0)$ — средняя вероятность ионизации, которая равна

$$P(j_0) = 1 - \exp \frac{-j_0 \sigma_1 \ell}{v_N}. \quad (2)$$

Здесь ℓ — длина пути ионизирующей частицы в разряде, v_N — ее скорость ($t = \frac{\ell}{v_N}$ — время нахождения частицы в разряде); σ_1 — сечение ионизации, зависящее от энергии электронов.

Из уравнения (2) видно, что вероятность ионизации, а, следовательно, и скорость ионизации пропорциональна току дуги при малых величинах и стремится к насыщению при очень больших токах. Она также является функцией энергии электрона и зависит от времени нахождения ионизирующей частицы в разряде. Число ионов зависит также от вероятности рекомбинации или перезарядки. Последние процессы делают увеличение числа многозарядных ионов критически зависимым от концентрации нейтральных частиц в разряде.

2. На основании классической теории ионизации электронным ударом ^{/14/} получается выражение для сечения однократной ионизации

$$\sigma_1 = \frac{c_1}{U U_1} \ell_n \frac{c_2 U}{U_1}, \quad (3)$$

где c_1 и c_2 — постоянные, U — энергия налетающего электрона, U_1 — энергия связи отрываемого электрона.

Хотя функция $\frac{1}{U} \ln U$ имеет максимум и последующий спад, следует подчеркнуть, что она применима только в области высоких энергий электронов.

Удобная аппроксимация^{/15/} для начального хода функции ионизации представляет собой соотношение

$$\sigma_i = a(U - U_i) \quad (4)$$

При подходе к максимуму и за максимумом в качестве приближения можно пользоваться выражением

$$\sigma_i = a(U - U_i) e^{-\frac{U - U_i}{b}} \quad (5)$$

В (4) и (5) величины a и b - эмпирические константы.

Для сечения ионизации многозарядных ионов вблизи порога ионизации ход кривой подчиняется показательному закону^{/16/}

$$\sigma_i = c(U - U_i)^n \quad (6)$$

где c - коэффициент пропорциональности, n - степень ионизации.

Экспериментальному определению сечений ионизации для образования многозарядных ионов при однократном столкновении с энергичным электроном в литературе посвящено много работ. Из опубликованных данных следует, что максимум сечения ионизации соответствует энергии налетающего электрона в 3-4 раза большей, чем суммарная энергия связи отрывааемых электронов. По данным опубликованных работ построены кривые зависимости сечения ионизации в максимуме для различных зарядностей некоторых элементов (см. рис. 1). Все кривые пронормированы к одной величине для однозарядных ионов. Из рис. 1 видно, что при однократном столкновении сечение ионизации уменьшается на порядок при увеличении заряда иона на единицу для легких элементов и в 6-7 раз - для более тяжелых элементов.

Отсюда следует, что эффективность образования ионов с зарядом в 5-10 единиц при однократном столкновении очень мала. По-видимому, преобладающим процессом образования многозарядных ионов в дуговом ионном источнике является ступенчатая ионизация, что подтверждается в работе^{/17/}. В некоторых

определенных случаях имеется большая вероятность образования многозарядных ионов за счет Оже-эффекта при выбивании внутреннего электрона атома (см., например, ^{120/}).

б) Источники многозарядных ионов

Основные требования, предъявляемые к параметрам разряда в дуговом источнике многозарядных ионов, следующие:

- а) Напряжение разряда должно быть достаточно высоким (400-1000 в вместо 100-200 в в случае источника для получения ионов водорода). Необходимость высоких напряжений определяется быстрым ростом потенциала ионизации по мере увеличения кратности заряда иона.
- б) Токи разряда должны иметь большие плотности. Это связано с тем, что, во-первых, сечения ионизации многозарядных ионов малы, а, во-вторых, поскольку многозарядные ионы, по-видимому, в основном образуются в результате ступенчатой ионизации, то необходимо, чтобы в разряде преобладали процессы, приводящие к повышению кратности заряда.
- в) Отбор многозарядных ионов должен производиться с того места, где они зародились, чтобы не произошло понижения заряда в результате столкновения с нейтральным атомом или с ионом меньшей кратности заряда.

Требование последнего пункта может быть выполнено выбором положения эмиссионной щели в газоразрядной камере, точной юстировкой взаимного расположения катода по отношению к стенке, в которой прорезана эмиссионная щель, и тонкой регулировкой подачи рабочего газа.

Первые два требования (пункты а) и б)) трудно совместить при постоянном режиме разряда, так как разогрев катода в результате ионной бомбардировки приводит к возникновению самостоятельного разряда, и, следовательно, к понижению напряжения на дуге. В импульсном режиме выполнить эти требования значительно легче.

В источнике для многозарядных ионов должна быть заложена возможность независимой регулировки в широких пределах тока и напряжения дуги, а также скорости подачи газа, так как при оптимальных выходах различных ионов эти параметры не совпадают (см. рис. 5, 6, 7 и 8).

Большие напряжения и большие токи в разряде требуют от конструкции источника интенсивного теплоотвода при малых геометрических размерах газоразрядной камеры и применения термостойких конструктивных и изоляционных материалов.

Характерными общими чертами всех известных источников многозарядных ионов для ускорителей являются: а) дуговой разряд при низком давлении (10^{-3} тор); б) наличие сильного магнитного поля (несколько килоэрстед), силовые линии которого параллельны оси разряда; в) осуществление осцилляции электронов вдоль газоразрядной камеры с целью увеличения эффективности ионизации. С точки зрения типа применяемых катодов источники делятся на две группы: с холодными катодами и с горячими катодами; последние, в свою очередь, имеют прямого накала и подогревные. В линейных ускорителях магнитное поле создается специальным магнитом или соленоидом; в циклотронах, как правило, источник находится в поле основного магнита. Для осуществления осцилляции электронов в конструкциях источников предусматривается наличие отражательного электрода (часто называемого антикатодом), на который обычно подается такой же потенциал, как на катод. В некоторых случаях этот электрод остается под "плавающим" потенциалом, будучи изолированным от всех других деталей.

В основу разработанных источников многозарядных ионов, применяемых в настоящее время на линейных ускорителях и циклотронах, положены три конструкции: а) источник с накаливаемым катодом (толстая танталовая или вольфрамовая нить) и "плавающим" антикатодом /18/; б) источник с холодными катодами, имеющими одинаковый потенциал /19/; в) источник с подогревным катодом и холодным антикатодом, имеющим потенциал катода /13/.

К недостаткам источника с катодом в виде накаленной нити следует отнести малый срок службы и малое напряжение на разряде из-за разогрева нити ионной бомбардировкой. Недостатком источника с холодными катодами является то, что для увеличения тока разряда необходимо увеличивать подачу газа в источник, т.е. связанность этих двух параметров. Преимуществом источника с подогревным катодом является независимая регулировка в широких пределах тока и напряжения на разряде и скорости подачи газа, а также приемлемый срок службы катода.

II. Исследование источника с подогревым катодом на стенде и циклотронах

Как указывалось ранее, при конструировании источника многозарядных ионов для ускорителей ОИЯИ за основу был принят источник последнего типа, конструкция которого удовлетворяет наилучшим образом вышеперечисленным требованиям к источникам многозарядных ионов. В процессе многолетней эксплуатации изменена схема питания источника (применен импульсный режим), а также введены некоторые конструктивные изменения (изменено сечение газоразрядной камеры, приведены в соответствие размеры эмиссионной щели и отсасывающего электрода на дуанте, способ крепления катода, вводы в вакуум электро-дов, место подачи газа в газоразрядную камеру и др.).

Схема газоразрядной головки и блок-схема питания источника показаны на рис. 2. Исследования источников проводились как на стенде /2,4,5,6,8,9/, так и на циклотронах /1,3,6,7/ (на трехметровом и полутораметровом).

Подогреваемый вольфрамовый катод (2) разогревается бомбардировкой электронами, эмитированными накаленной нитью (1); антикатод (4) – молибденовый; анод (3) (он же – газоразрядная камера) – медный, охлаждаемый. Для осуществления импульсного режима работы источника синхронно с циклотроном используются модуляторные лампы типа ГМ-1А (две в параллель).

Исследования проводились на специально созданном стенде, в котором применялся принцип разделения ионов по зарядам при повороте на 180° в однородном магнитном поле. Кроме этого применялся оптический метод исследования разряда. При исследованиях на циклотронах пробник вводился на внутренний радиус ускорителя, где и регистрировались попадающие на коллектор ускоренные ионы.

На стенде при исследовании ионных источников изучалось влияние следующих факторов на спектральный состав ионов различных элементов:

- а) места подачи газа в газоразрядную камеру (результаты приведены в табл. 1);
- б) длины газоразрядной камеры (результаты приведены в табл. 2);
- в) мощности в разряде;
- г) мощности подогрева катода;
- д) расхода газа в единицу времени;

е) определялась относительная концентрация различных ионов и нейтральных частиц вдоль разряда и по сечению разряда (как частиц подаваемого газа, так и распыленных материалов катода и антикатада);

ж) было выяснено влияние параметров разряда на скорость распыления катода.

Исследования источников на циклотронах имеют свои преимущества:

1) источник находится и работает в реальных условиях; 2) на циклотроне легко отделяются ионы, имеющие близкие отношения A/Z . К недостаткам следует отнести то, что интенсивность тока ионов на коллектор пробника зависит не только от режима работы источника, но и от настройки циклотрона.

На циклотронах изучалось влияние параметров разряда, размеров эмиссионной щели и места подачи газа в источник на выход многозарядных ионов.

В опытах по определению скорости распыления катода было найдено, что она почти не зависит от рода подаваемого в источник газа. На основании этих данных показано, что распыление катода идет в основном ионами, полученными из частиц материала катода, т.е. происходит самораспыление.

Оказалось, что количество распыленного с катода вольфрама можно рассчитать по эмпирической формуле:

$$\Delta M = A I U^2 \frac{t}{Q},$$

где ΔM — вес распыленного вольфрама (г); I — ток дуги (а);

U — напряжение на дуге (кв); t — время работы (час);

Q — скважность импульсной работы источника (отношение периода следования импульсов к длительности импульса);

$A = 1,5 \pm 0,3$ — коэффициент пропорциональности.

Оптическим методом было определено относительное распределение концентрации ионов газа и материалов катода и антикатада вдоль разряда (рис. 3). Из рисунка видно, что наибольшее количество ионов газа находится примерно посередине газоразрядной камеры, если коэффициенты катодного распыления катода (вольфрам) и антикатада (молибден или железо) равны или близки по значению. Около катода и антикатада преобладают ионы из материалов этих электродов. При этом, чем больше коэффициент катодного распыления материала антикатада (например, медь), тем дальше продвигаются эти ионы и дальше от него смещается максимум концентрации ионов газа.

Такое распределение относительной концентрации объясняется тем, что со стороны катода и антикатада во время разряда в результате катодного распыления создаются большие концентрации частиц ($\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$) их материалов, которые и оттесняют частицы газа к средней части камеры.

На рис. 4 показано распределение концентрации ионов по сечению газового разряда. На оси концентрация ионов примерно в два раза выше, чем на границе плазмы.

Спад концентрации ионов от оси к границе плазмы объясняется уходом ионов на стенки камеры и уменьшением температуры боковых стенок катода, что приводит к уменьшению плотности электронов вдоль разряда в этих местах.

На рис. 5-7,8 и 9 представлены некоторые характеристики ионного источника по основным параметрам дугового разряда, влияющим на выход многозарядных ионов.

В таблице № 3 приведены токи некоторых ионов, полученные с помощью исследовавшегося источника с подогреваемым катодом на полуметровом и трехметровом циклотронах ОИЯИ.

В таблице 4 и на рис. 10 приведены величины токов, полученных на стенде, различных тяжелых ионов при настройке параметров источника на оптимум выхода высокозарядных ионов. Для сравнения приведены результаты, полученные из источника с холодными катодами, применяемого на американских линейных ускорителях /19,21/.

Из рис. 5 и 6 видно, что в большинстве случаев, чем меньше подается газа в ионный источник (вплоть до срыва дуги), тем больше получается многозарядных ионов, причем такая зависимость сильнее для ионов с высоким зарядом.

Одна из причин увеличения интенсивности многозарядных ионов при уменьшении подачи газа состоит в том, что при понижении концентрации нейтральных частиц повышается температура электронов.

Во-вторых, такой ход кривых, по-видимому, объясняется еще и тем, что с уменьшением концентрации частиц в разряде увеличивается время жизни иона. А поскольку основными процессами образования многозарядных ионов являются, по-видимому, ступенчатые процессы /17/, то необходимо, чтобы время жизни ионов и с малой зарядностью было велико.

Как указывалось в работе /17/, при увеличении расхода газа увеличивается

ионная составляющая и уменьшается электронная составляющая общего тока дуги. Это также приводит к уменьшению выхода многозарядных ионов.

Из рис. 7 и 8 видно, что при увеличении напряжения или тока дуги с некоторого момента начинается спад интенсивности. При этом, чем выше зарядность иона, тем выше напряжение или ток дуги, соответствующие максимуму выхода данных ионов.

Одной из основных причин спада интенсивности после максимума является появление в разряде большого количества частиц материалов катода и антикатода, концентрация которых становится сравнимой с концентрацией частиц подаваемого газа^{/4/}. Увеличение концентрации этих частиц сказывается подобно увеличению потока газа в ионный источник, а последнее, как было показано выше, приводит к уменьшению выхода многозарядных ионов. При появлении частиц материалов катода и антикатода в разряде оптическим методом наблюдалось понижение температуры электронов^{/8/}.

Из рис. 10 видно, что чем тяжелее атом, тем больше ток высокозарядных ионов одинаковой кратности заряда и тем выше средний эффективный заряд извлеченных из источника ионов. Видно также, что интенсивность токов ионов Kr и Xe мало меняется до восьмикратной зарядности.

З а к л ю ч е н и е

1. В результате полученных данных и характеристик источника с подогревным катодом, применения импульсного режима работы источника, позволившего вводить большую мощность в разряд во время импульса, некоторых конструктивных изменений (подбора соответствующего сечения газоразрядной камеры, подбора размеров эмиссионной щели и взаимного расположения ее с отсасывающим электродом, определения места подачи газа) получены интенсивные пучки многозарядных ионов легких элементов из источника при работе на циклотронах (см. табл. 3).

2. При стендовых испытаниях получены большие токи высокозарядных сверхтяжелых ионов (криптона, ксенона, вольфрама). Было обнаружено, что в таком источнике интенсивность пучков ионов до заряда $8+$ слабо падает. Токи ионов ($Z \geq 4$) криптона и ксенона больше примерно в 10 раз, чем токи этих же

ионов, полученные из источника с холодными катодами, применяемого на американских линейных ускорителях. Многозарядные ионы такого тяжелого элемента как вольфрам получены впервые (см. табл. 4).

Кроме того, в результате проведенных исследований на стенде и на циклотронах получены следующие данные и характеристики работы источника многозарядных ионов.

3. Определены зависимости выхода различных ионов от мощности в разряде, а также от тока и напряжения дуги. Из результатов, полученных на стенде и циклотронах, видно, что токи ионов различной кратности имеют максимумы в зависимости от мощности в разряде (от 6 до 25 квт). При небольших геометрических размерах газоразрядной головки, ограниченных центром циклотрона, такие мощности можно подавать в разряд только в импульсе. Введение импульсного режима работы дуги позволило значительно увеличить средний ток ионов из источника. Наблюдаемый спад интенсивности пучка после максимума в основном можно объяснить появлением в разряде большого числа частиц вещества катода и антикатода.

4. С увеличением потенциала ионизации ионов необходимо увеличивать напряжение на дуге, соответствующее максимальному выходу этих ионов (см. рис. 7).

5. Исследовано влияние мощности подогрева катода (рис. 9). В зависимости от мощности подогрева имеется максимум выхода многозарядных ионов. Для ионов с зарядом 4-5 электронных единиц он широкий, а для ионов Ag^{7+} и Ag^{8+} он очень узкий (ширина на полувысоте при исследованиях на циклотроне ~ 10% от мощности в максимуме; на стенде ширина его значительно больше).

6. Выход многозарядных ионов увеличивается при уменьшении расхода газа почти до срыва дуги. Иногда наблюдается максимум на этой кривой перед тем, как дуга начинает срываться. Крутизна подъема кривой при уменьшении потока тем больше, чем выше заряд иона.

7. Измерены зависимости выхода многозарядных ионов от геометрических размеров газоразрядной камеры. Установлено, что:

а) длина газоразрядной камеры мало влияет на выход многозарядных ионов, получаемых из газа, хотя с увеличением длины газоразрядной камеры увеличивается мощность в разряде при получении тех же величин ионных токов;

б) соотношение размеров сечений газоразрядной камеры и грани катода,

обращенной к разряду, является важным фактором, обуславливающим величины ионных токов.

8. Обнаружено, что с увеличением порядкового номера ионизируемого элемента отношение тока ионов с зарядом $Z + 1$ к току ионов с зарядом Z увеличивается.

9. Основной причиной, определяющей время работы источника, является распыление катода ионной бомбардировкой. Опыты показали, что в источнике с мощным дуговым разрядом распыление катода в основном идет ионами материала катода, т.е. происходит самораспыление. Поэтому скорость распыления катода почти не зависит от рода подаваемого в источник газа.

10. Показано, что скорость распыления катода пропорциональна току дуги и квадрату напряжения на дуге. Подобрана эмпирическая формула для расчета распыленного с катода вольфрама.

11. Оптическим методом измерено, что в исследовавшемся источнике:

а) Распределение относительной плотности имеет максимум вдоль разряда для нейтральных частиц и ионов подаваемого в источник газа. Этот максимум находится вблизи середины газоразрядной камеры. У катода и антикатода преобладают атомы и ионы материалов этих электродов.

б) На оси разряда концентрации всех ионов больше, чем на границе плазмы, примерно в два раза.

Результаты исследования источников на стенде и циклотронах, а также литературные данные говорят о том, что дуговой источник с подогревным катодом и осциллирующей электроном вдоль разряда способен выдавать более интенсивные пучки многозарядных ионов, чем другие известные типы ионных источников.

Большие токи многозарядных ионов в циклотронах позволили осуществить постановку интересных экспериментов, в результате которых получены новые весьма важные физические открытия (спонтанное деление с изомерного состояния, трансураниевые элементы 104, 103, 102 и др., испускание протонов радиоактивными ядрами) и другие данные о взаимодействии многозарядных ионов с ядрами (кулоновское возбуждение с большим угловым моментом, реакции обмена и т.д.).

Полученные большие токи тяжелых ионов (криптон, ксенон, вольфрам) в перспективе могут дать возможность проводить опыты по получению изотопов вблизи ядер с зарядом 114 и 126, где предполагаются островки относитель-

ной стабильности. Наличие таких энергичных ионов даст возможность поставить и другие весьма интересные эксперименты по взаимодействию сверхтяжелых ядер.

Л и т е р а т у р а

1. А.С. Пасюк, И.А. Шелаев, Го Ци-цянь, Ю.П. Третьяков. ПТЭ № 5, 23 (1963); препринт ОИЯИ № 924, Дубна 1962 г.
2. А.С. Пасюк, Го Ци-цянь, Ю.П. Третьяков. Препринт ОИЯИ № 1523, Дубна 1964.
3. А.С. Пасюк, Го Ци-цянь. ПТЭ № 1, 28 (1965); препринт ОИЯИ № 1522, Дубна 1964 г.
4. А.С. Пасюк, Ю.П. Третьяков, В. Станку. ПТЭ, № 3, 42 (1965); препринт ОИЯИ № 1644, Дубна, 1964 г.
5. Л.П. Кулькина, А.С. Пасюк. ЖТФ, т. 36, вып. 4, 726 (1966); препринт ОИЯИ № Р-2043, Дубна 1965 г.
6. А.С. Пасюк, Ю.П. Третьяков. ПТЭ № 4, 35, (1967).
7. А.С. Пасюк. Материалы конференции по ядерным реакциям с многозарядными ионами, 1958 г. Препринт ОИЯИ № Р-374, Дубна 1959 г.
8. Н.П. Романов, А.С. Пасюк. Препринт ОИЯИ № 7-3080, Дубна 1966 г.
9. А.С. Пасюк, Ю.П. Третьяков, С.К. Горбачев. Препринт ОИЯИ № 7-3370, Дубна 1967 г. Дополнительная литература, использованная в автореферате.
10. G.N.Flerov. Proc. of the II- United Nat.Intern.Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1958, P/2299, 11, 151.
11. Б.А. Загер, Г. Индреаш, В.Г. Тишин, И.А. Шелаев. ПТЭ, № 2, 20 (1963).
12. Материалы конференции по ядерным реакциям с многозарядными ионами, 1958 г., Препринт ОИЯИ № Р-374, Дубна 1959 г.
13. П.М. Морозов, Б.Н. Маков, М.С. Иоффе. Атомная энергия, 2, № 3, 272 (1957).
14. А. Энгель. Ионизованные газы, Гос. изд. физ. мат.лит., Москва, 1959.
15. Н.А. Канцов. Электроника, Гос.изд.техничко-теорет. лит., Москва, 1953 г.
16. S.Geltman. Phys. Rev., 102, 171 (1956).
17. Ю.Д. Пигаров, П.М. Морозов. ЖТФ, т. 31, 467 и 476 (1961).
18. R.Y.Yones, A.Zucker. RSI, 25, 562 (1956).
19. C.E.Anderson, K.W.Ehlers. RSI, 27, 909 (1956)
20. B.L.Schram, A.Y.H.Boerboom, Y.Kistemaker, Physica, 32, 185 (1966); B.L.Schram, Physica, 32, 197 (1966).

21. A.Giorso, R.M.Main, B.H.Smith. Препринт, 1966.
UCRL-16839.
22. The Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields, Mc Grow-Hill Book Company, INC,
New-York-Toronto-London, 1949.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 июня 1967 г.

Таблица 1. Зависимость выхода ионов азота от места подачи газа. Длина газоразрядной камеры 200 мм. Источник настраивался на максимум выхода ионов N^{4+}

Место подачи газа	Ток ионов азота (относит. ед.)				Расход газа (см ³ /мин)
	I+	2+	3+	4+	
В область катода	6,9	11,0	6,5	1	1,7
В область катода и в середину	7,3	9,0	5,6	1,0	1,9
В область катода, антикатода и в середину	5,7	9,9	6,6	0,90	2,0
В середину	18,0	5,9	2,8	0,4	2,3

Таблица 2. Зависимость выхода ионов азота от длины газоразрядной камеры. Источник настраивался в оптимальный режим по выходу ионов N^{4+}

Длина камеры (мм)	Заряд иона	85	150	200
Токи ионов во 2-ом максимуме (в % к общему току)	I+	31,0	26,5	15,0
	2+	29,0	33,0	34,5
	3+	32,0	32,0	40,0
	4+	7,3	8,0	9,8
	5+	0,55	0,57	0,59
Импульсная мощность в разряде (усредненная по нескольким данным)		24 кВт	30 кВт	36 кВт

Таблица 3. Токи некоторых ионов, полученных на циклотронах ОИЯИ

Ускоритель	У-300						У-150					
Ускоряемые ионы	Si ⁵⁺ ₂₈	S ⁷⁺ ₃₂	Ar ⁷⁺ ₄₀	Ar ⁸⁺ ₄₀	Ne ⁴⁺ ₂₀	Ne ⁵⁺ ₂₂	Ne ⁶⁺ ₂₀	Ne ⁷⁺ ₂₀	C ⁴⁺ ₁₂	N ⁵⁺ ₁₄	O ⁸⁺ ₁₆	Ge ⁸⁺ ₇₀
Средний ток ионов (мкА)	10	1	5	1	100	1	1,2	<0,01	100	50	50	1
Газ, подаваемый в источник	SIF ₄	SO ₂	Аргон техническ.		Неон (естественная смесь)			CH ₄	воздух	O ₂	GeF ₄	
Токи ионов в ИАС (мкА) /7/	-	-	-	-	-	-	-	-	5	1-1,5	0,5-1	-

ПРИМЕЧАНИЯ: 1. Токи ускоренных ионов измерялись при положении пробников на У-300 - r = 100 см, на У-150 - r = 80 см.

2. Ионы Ge⁸⁺₇₀ ускорялись на 3-й гармонике.

Таблица 4. Токи ионов Ar, Kr, Xe и W, полученные при стендовых испытаниях источников

Тип источника	Ион	U (в) д	I (а) д	I+	2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+	9+	10+	11+	12+
Пологревный катод	Ar	900	6	20	37	42	25	7	1,6	0,4	0,1				
	Kr	450	12,7	11	17	40	47	32	20	7	2,5	0,2	0,03		
	Xe	600	13	4	12	31	35	39	35	30	24	5,9	2	0,4	0,1
	W из WFe	500	6,5	-	-	-	2	3	6	5	2	1,6	0,4	0,2	0,05
	W из расп. катода	900	5	-	-	-	3,4	9,2	10,6	5,4	1,3	0,52	0,05	-	-
Холодные катоды		2900	0,9	-	4,2	2,2	1,7	0,75	0,25	0,06	0,015				
		1500	2	1,5	1,3	1	0,83	0,58	0,38	0,17	0,07	0,04	0,012		
		1500	2	1,9	1,6	1,3	1	0,9	0,5	0,45	0,25	0,14	0,07	0,02	0,01

ПРИМЕЧАНИЯ: 1. Величины токов, приведенные в таблице, означают ток ионов в импульсе (ма).

2. Данные для источника с холодными катодами взяты для Ar из работы /18/, для Kr и Xe - из работы /21/.

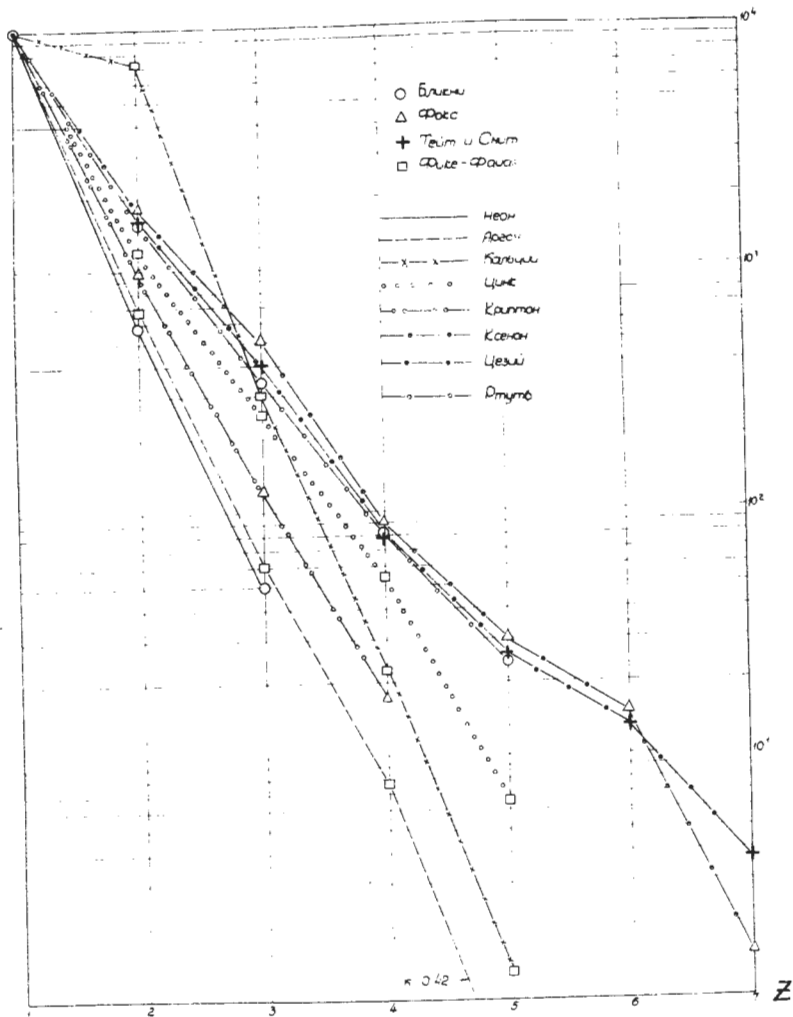


Рис. 1. Максимальные сечения ионизации для ионов различной зарядности некоторых атомов. Все кривые пронормированы так, что сечения ионизации однократно заряженных ионов сведены к одной величине. По оси абсцисс — заряд иона в электронных единицах.

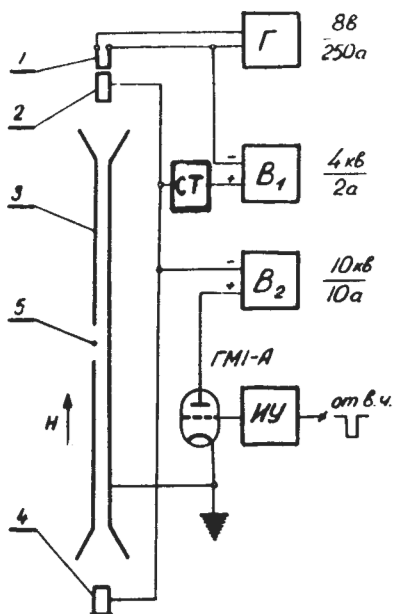
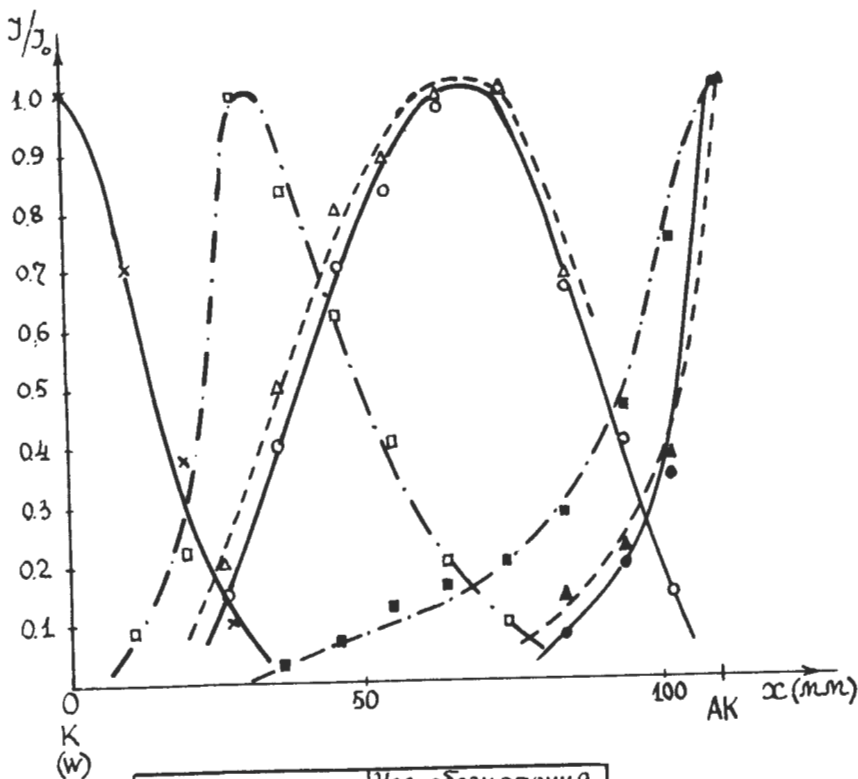


Рис. 2. Головка источника и блок-схема питания источника. 1-нить, 2-катод, 3-анод, 4-антикатод, 5-эмиссионная щель, ИУ-импульсный усилитель, Г-машинный преобразователь частоты (5-10 кгц) или выпрямитель, СТ-стабилизатор тока подогрева катода, Н- направление магнитного поля. Числа у блоков соответствуют максимальным значениям напряжения и тока этих узлов.



Материал анткатода (АК)	Усл. обозначения	
	Яг	АК
Мо	○—○	●—●
Си	□—□	■—■
Ст 3 (Fe)	Δ—Δ	▲—▲

Рис. 3. Распределение интенсивности спектральных линий аргона вдоль газового разряда при разных материалах анткатода (АК). Кривая, проведенная по крестикам (X), — интенсивность линий вольфрама из катода (К).

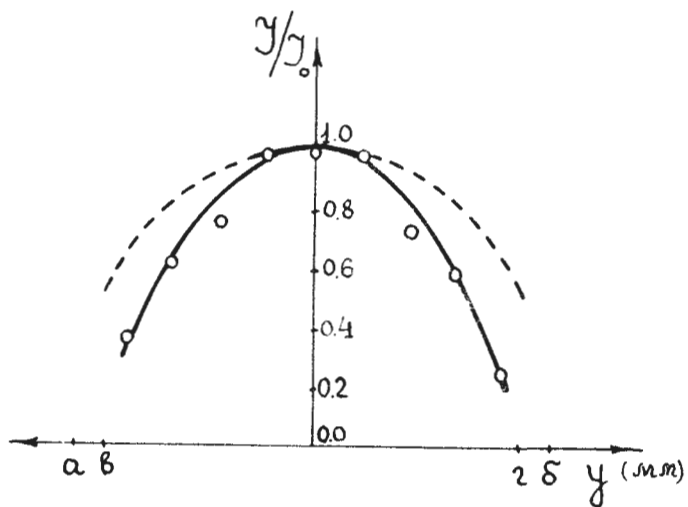


Рис. 4. Распределение интенсивности спектральных линий неона по сечению дугового разряда. Точки а и б на оси γ обозначают стенки камеры, точки в и г - границы катода.

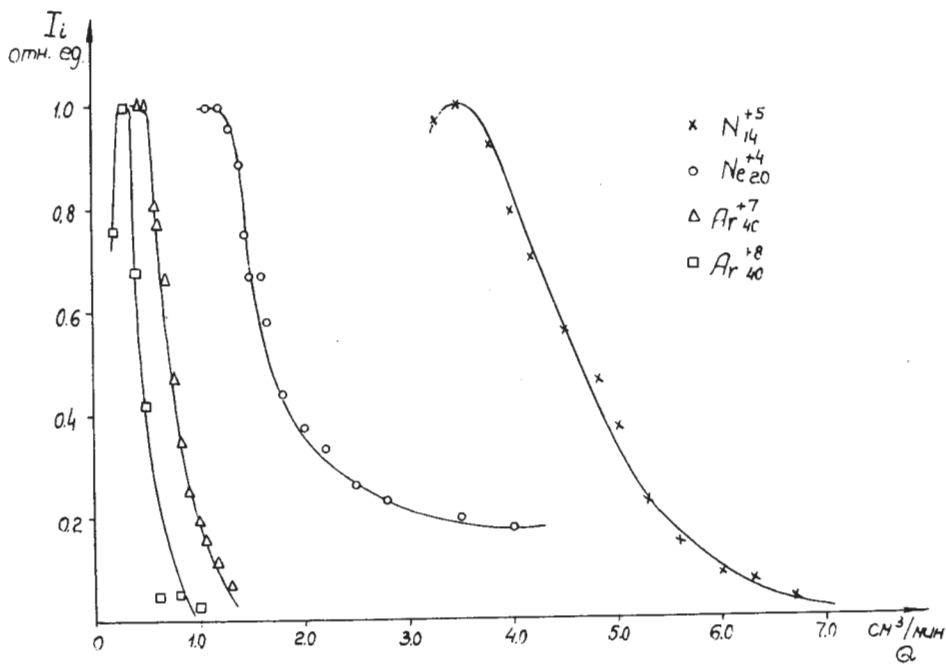


Рис. 5. Зависимость тока ионов Ne_{20}^{4+} , Ar_{40}^{7+} , Ar_{40}^{8+} и N_{14}^{5+} от расхода газа в единицу времени. Кривые пронормированы к единице в максимуме тока соответствующих ионов. Ионы N_{14}^{5+} ускорялись на циклотроне У-150, а остальные - на У-300.

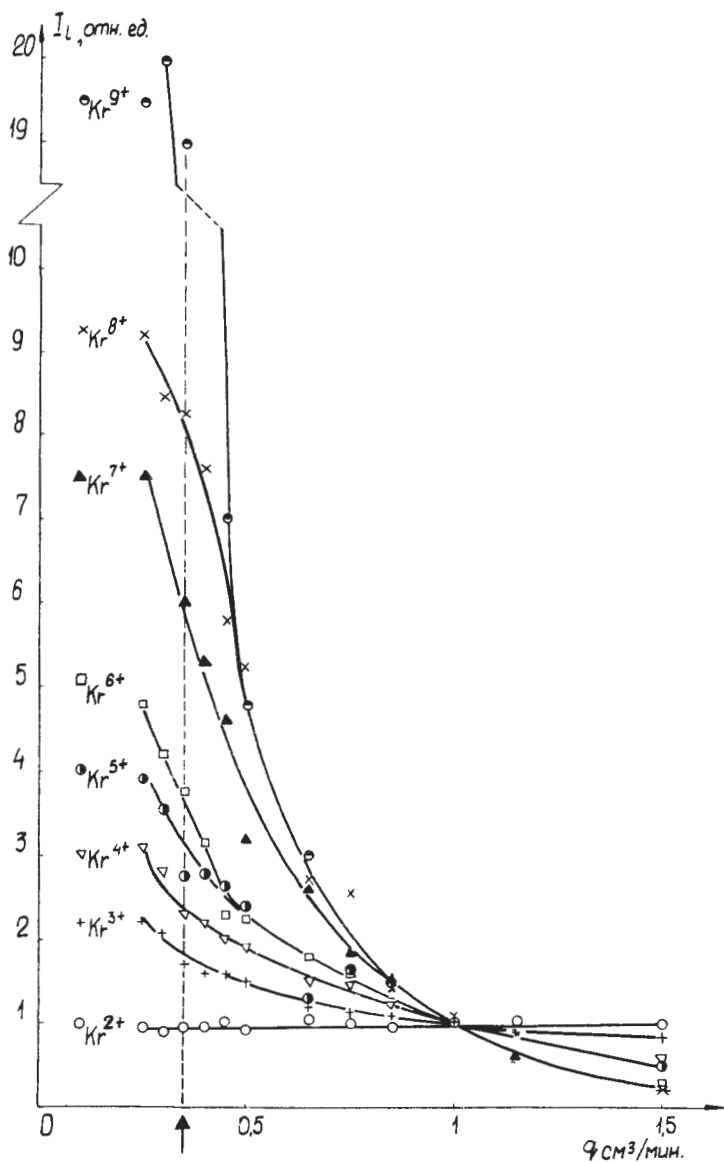


Рис. 6. Зависимость выхода ионов криптона от расхода газа. Кривые пронормированы к единице при $\phi = 1 \text{ см}^3/\text{мин}$. Ток дуги $I_{\text{д}} = 4,8 \text{ а}$, напряжение дуги $U_{\text{д}} = 600 \text{ в}$. Стрелка указывает оптимальный расход газа.

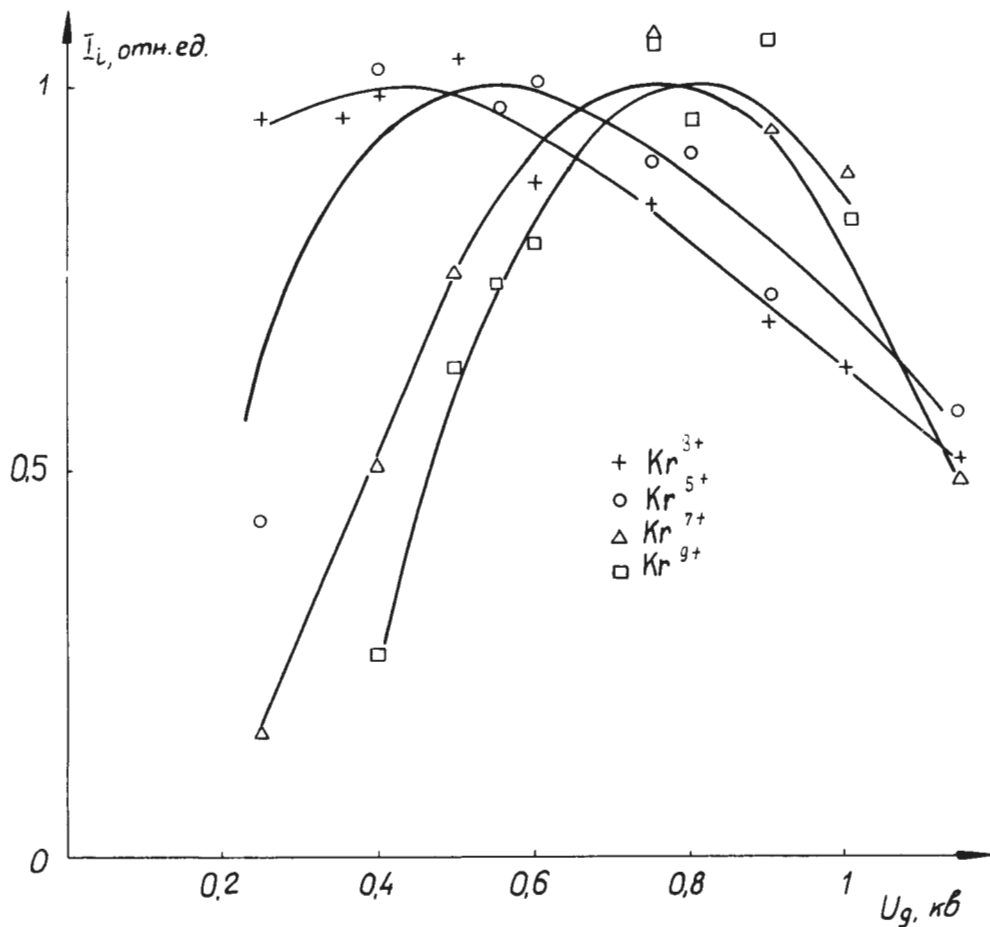


Рис. 7. Зависимость выхода многозарядных ионов криптона от напряжения на дуге. Ток дуги $I_d = 5$ а. Кривые пронормированы к единице в максимуме.

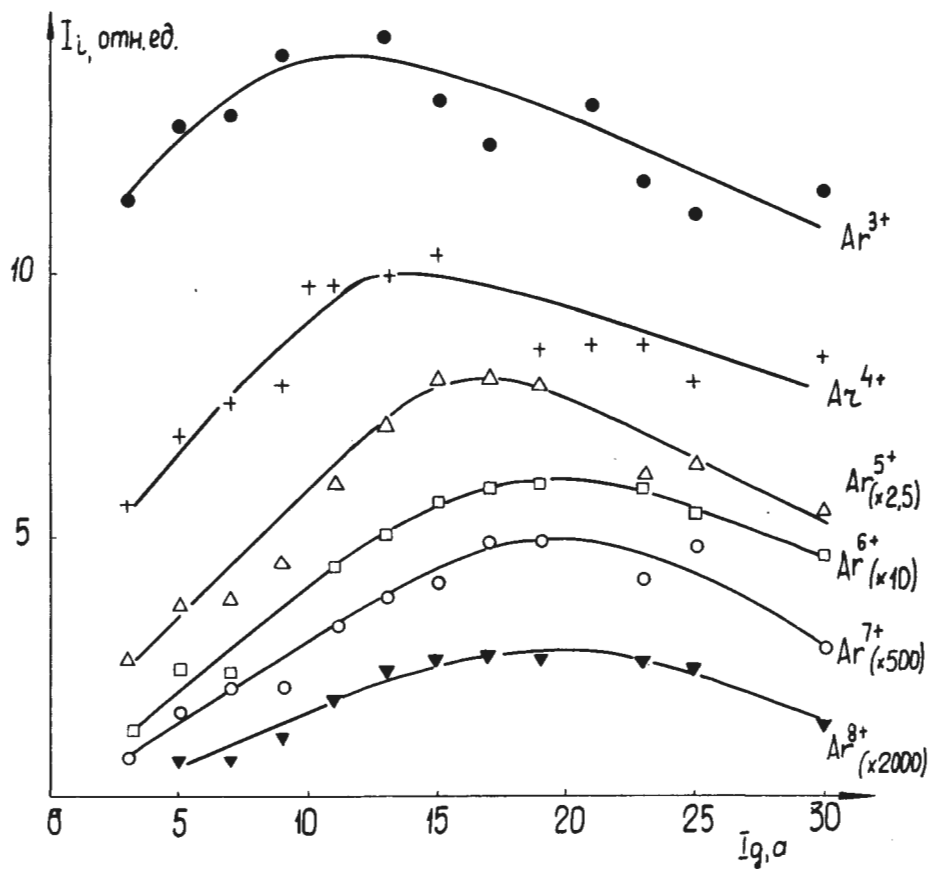


Рис. 8. Зависимость выхода ионов аргона от тока дуги. Напряжение дуги $U_d = 550$ в. Числа в скобках означают коэффициент увеличения данных.

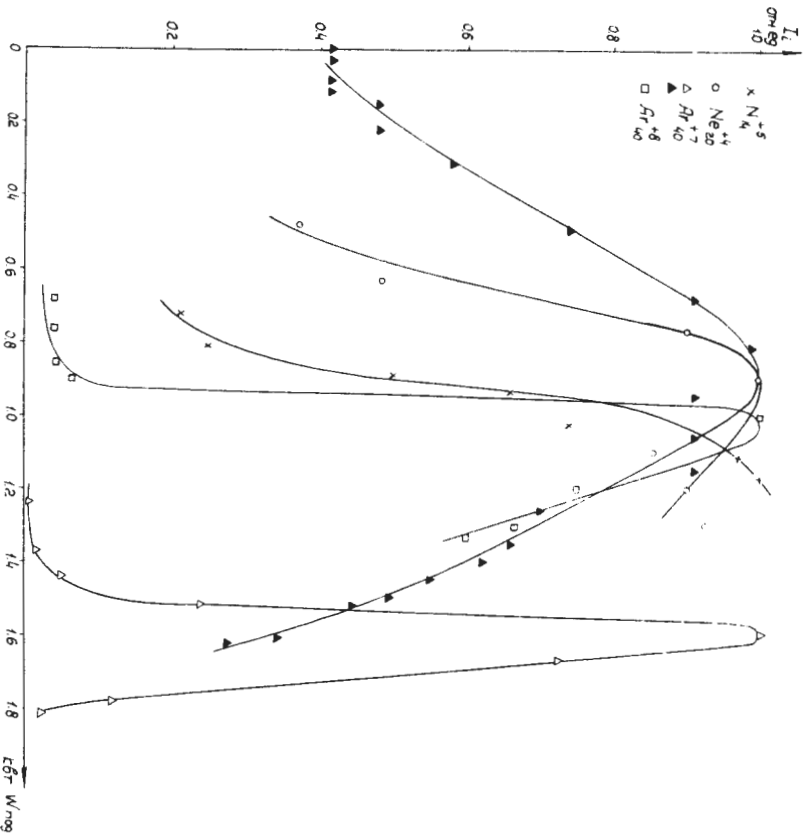


Рис. 9. Зависимость тока ионов Ne_{20}^{4+} , Ar_{40}^{7+} , Ar_{40}^{8+} , N_{14}^{5+} от мощности подогрева катода. Кривые пронумерованы к линии в максимуме тока соответствующих ионов. Ионы N_{14}^{6+} ускорились на циклотроне У-150, а остальные — на У-300.

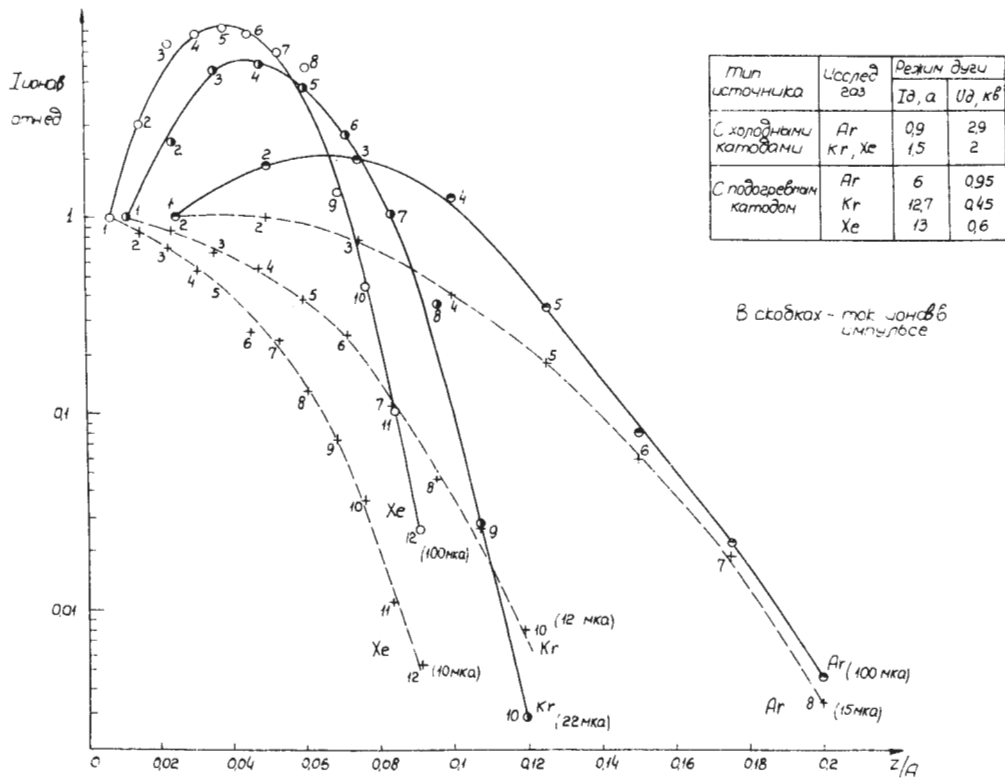


Рис. 10. Относительный выход ионов аргона, криптона и ксенона по зарядности. Кривые пронормированы к току однозарядных ионов. Цифры на кривых указывают заряд иона. В скобках указано абсолютное значение тока в импульсе для ионов Ar^{5+} , Kr^{10+} , Xe^{12+} . Пунктирные кривые - данные американских работ [19, 21].