



ТМЭ, № 1, 1968

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

А.С.Пасюк, Го Ци-цянь

1522

ПОЛУЧЕНИЕ ИОНОВ УГЛЕРОДА,
АЗОТА, КИСЛОРОДА, НЕОНА И АРГОНА
В ИМПУЛЬСНОМ ИСТОЧНИКЕ
И УСКОРЕНИЕ ИХ НА ЦИКЛОТРОНАХ

Дубна 1964

А.С.Пасюк, Го Ци-цзянь

1522

ПОЛУЧЕНИЕ ИОНОВ УГЛЕРОДА,
АЗОТА, КИСЛОРОДА, НЕОНА И АРГОНА
В ИМПУЛЬСНОМ ИСТОЧНИКЕ
И УСКОРЕНИЕ ИХ НА ЦИКЛОТРОНАХ

Направлено в ПТЭ

ПТЭ № 1, (1965)

Дубна 1964

Ранее ^{/1/} были приведены некоторые данные о получении ионов N^{+4} в импульсном источнике многозарядных ионов (МЗИ), применяющемся в ОИЯИ на циклотроне У-300. Проводились дальнейшие исследования ионных источников, применяемых на циклотронах У-300 и У-150 ^{/2/}. При этом ускорялись ионы: на У-300 - Ne^{+4} , Ne^{+4} , Ar^{+7} , Ar^{+8} ; на У-150 - C^{+4} , N^{+5} , O^{+5} , Ne^{+6} , Ne^{+7} . Отличие источников, применяемых на разных циклотронах, заключается только в длине газоразрядной камеры: на источнике для У-300 длина камеры в 2,6 раза больше, чем на У-150. Выбор длин камер обусловлен только конструктивными размерами циклотронов. Электрические схемы питания ионных источников одинаковые в обоих случаях. Схемы геометрии электродов центра обоих циклотронов аналогичны ^{/1/}.

x x
 x

При проведении опытов на У-300 пробник с коллектором вводился на радиус 100 см, на У-150 - на радиус 50 см. Выбор таких радиусов объясняется следующим. Ток ионов на пробник зависит как от работы источника, так и от величины высокочастотного напряжения на дуантах. При работе на конечных радиусах циклотронов У-300 и У-150 разница между высокочастотным напряжением, поддерживаемым на дуантах, и напряжением нулевой интенсивности на этих радиусах будет значительно меньше, чем при работе на меньших радиусах. В последнем случае крутизна наклона кривой зависимости тока ионов от напряжения на дуантах будет меньше ^{/3/}, следовательно, его влияние на изменение тока ионов будет слабее. При слишком малых радиусах резонансные кривые расширяются, и разрешение по A/Z ухудшается (A - атомный вес иона, Z - заряд иона). Кроме того, при переходе от одной частицы к другой без перестройки высокочастотного генератора с резонансными линиями при одних и тех же шиммах в зазоре магнита влияние спада магнитного поля на интенсивность тока меньше сказывается при малых радиусах. По этим причинам работа на указанных радиусах оказалась наиболее удобной.

Во всех случаях производилось измерение среднего тока с помощью интегратора слабых токов ^{/4/}. Методика измерений ионных токов, за исключением тока ионов Ar^{+8} , такая же, как описана в работе ^{/1/}. Сложность в определении тока ионов Ar^{+8} заключается в следующем.

При ускорении ионов Ar^{+8} выяснилось, что резонанс по току электромагнита

У-300 для ускорения ионов Ar_{40}^{+8} меньше только на 3 ± 4 ампера, чем для ионов Ne_{20}^{+4} . А так как в техническом аргоне всегда имеются небольшие примеси неона, то возникают сложности в определении соотношения токов указанных ионов. При прочих равных условиях ионы Ar_{40}^{+8} имеют энергию в два раза большую, чем ионы Ne_{20}^{+4} . В применяемом пробнике, помимо коллектора, измеряющего полный ток ионов, был вмонтирован кремниевый поверхностно-барьерный детектор^{/5/}, с помощью которого измерялась энергия ионов и соотношение токов с разными энергиями^{/6/}.

Таким образом во время работы с ионами Ar_{40}^{+8} можно было непрерывно контролировать соотношение токов ионов Ar_{40}^{+8} и Ne_{20}^{+4} и поддерживать режимы работы источника и ускорения такими, когда в полном токе на коллектор пробника вклад от ионов Ne_{20}^{+4} лишь в отдельных случаях составлял несколько процентов от общего тока.

Исследования на У-300

Выход МЗИ зависит как от геометрии газоразрядной камеры и центра циклотрона, так и от режима работы источника (мощность разряда, мощность подогрева катода, расход газа).

В предыдущих опытах на У-300^{/1/} была определена оптимальная длина эмиссионной щели и длительность импульса работы источника. В настоящей работе приводятся результаты исследования зависимости выхода МЗИ:

- от ширины эмиссионной щели,
- от места подачи газа в газоразрядную камеру,
- от режимов работы источника.

1. При определении влияния ширины щели на выход МЗИ длина ее оставалась постоянной. Как было определено ранее, оптимальная длина для применяемого центра равна 20 мм. В опытах ускорялись ионы Ne_{22}^{+4} из естественной смеси неона.

Результаты выхода ионов при разной ширине эмиссионной щели сведены в таблицу 1. При настройке источника на максимум тока Ne_{22}^{+4} с разными щелями режим источника с увеличением щели несколько изменялся, расход газа увеличивался.

Т а б л и ц а 1

Ширина эмиссионной щели (мм)	2,2	2,6	3,4	3,9
Ток ионов (мкА)	7,5	12	13	12
Расход газа (см ³ /мин)	1,3	1,5	1,7	1,9

Как видно из таблицы, ток Ne^{+4}_{22} практически мало меняется при ширине щели большей 2,5 мм. При ширине щели большей 4 мм в источник требуется подавать значительно больше газа, иначе работа его становится неустойчивой.

II. Для определения места подачи газа в газоразрядную камеру источника, при которой получается наибольший выход МЗИ, был изготовлен источник с двумя газопроводами; по одному из них газ подавался вблизи катода, по другому — в середину газоразрядной камеры. Таким образом, можно было выбирать один из трех вариантов подачи газа:

- а) вблизи катода,
- б) в середину газоразрядной камеры,
- в) вблизи катода и в середину одновременно.

В каждом случае режим источника по всем параметрам подбирался по максимуму тока на пробник. Полученные результаты сведены в таблицу 2. Как видно из таблицы, наилучшие результаты получаются при подаче газа в область катода. Это особенно заметно при получении ионов Ne^{+4}_{22} .

Т а б л и ц а 2

Ускоряемые ионы	Подаваемый газ	Место подачи газа	Ток ионов (мкА)	Мощность в импульсе дуги (кВт)	Мощн. подогрева катода (кВт)	Расход газа (см ³ /мин)
Ne^{+4}_{22}	Неон (естественная смесь)	вблизи катода	6	6,3	1,3	1,6
		вблизи катода и в середину	5	7,5	1,3	1,8
		в середину	4	11	1,4	2,0
Ar^{+7}_{40}	Аргон (технический)	вблизи катода	4,3	4,3	1,5	0,23
		вблизи катода и в середину	4,0	4,3	1,5	0,25
		в середину	3,5	5,2	1,5	0,33

III. При настройке источника на величину тока МЗИ влияют в основном три параметра:

- а) мощность в дуговом разряде,
- б) мощность подогрева катода,
- в) давление газа в газоразрядной камере (или расход газа в единицу времени при постоянной геометрии).

В дальнейших опытах исследовалась зависимость выхода МЗИ от этих трех параметров. Во всех случаях ионный источник по всем параметрам настраивался на максимум тока МЗИ, а затем изменялся один из выше приведенных трех параметров, и измерялся ток на пробник. При этом остальные параметры стремились удержать неизменными, хотя это не всегда удавалось. Это особенно относится к напряжению на дуге. Так, например, при изменении мощности подогрева катода или расхода газа можно получить постоянную мощность дуги, но напряжение на ней в этом случае изменится, хотя и в небольших пределах (от 5 до 20%) в зависимости от источника и времени его работы. Наоборот, при изменении мощности в дуге расход газа и мощность подогрева катода легко удерживать постоянными (если не учитывать изменение газовыделения с внутренних стенок при изменении мощности разряда). При увеличении мощности, вводимой в разряд, в основном увеличивался ток дуги, а не напряжение на ней. На основании выводов работы [7] спектр МЗИ мало изменяется при постоянной мощности разряда, хотя ток дуги и напряжение на ней могут изменяться в значительных пределах. Поэтому при построении серии кривых более удобно отложить по оси абсцисс мощность в дуге. Изменение напряжения на дуге обозначено на рисунках пунктирными линиями. Результаты работы ионного источника при различных значениях указанных параметров, полученные на циклотроне У-300, приведены на рис. 1, 2, 3. На этих рисунках величины токов ионов указаны в относительных единицах, соотношения между максимумами разных ионов - не в масштабе.

Исследования на У-150

При исследовании источника ионов на циклотроне У-150 методика измерений была аналогична методике, применяемой на У-300. Частота посылок равна 100 гц, длительность импульса - 1 мсек. Газ в источнике подается вблизи катода. Ширина эмиссионной щели равна 2,5 мм.

1. В первых опытах на циклотроне У-150 была подобрана оптимальная длина эмиссионной щели, так как размеры и формы вытягивающего электрода, закрепленного на дуанте У-150, несколько отличаются от размеров электрода, применяемого на У-300.

В этих опытах ускорялись ионы N_{14}^{+5} . В источник подавался воздух. Для каждой длины щели подбирался оптимальный режим работы источника. Результаты опытов сведены в таблицу 3. В последней строке таблицы даны значения тока с учетом зависимости его от вакуума в камере циклотрона. Эта зависимость графически изображена на рис. 4.

Т а б л и ц а 3

Длина эмиссионной щели (мм)	12	16	20	26,5
Измеренный средний ток ионов (мка)	2,5	4,8	8,0	8,5
Вакуум в циклотроне ($\times 10^5$ мм Hg)	2,2	3,2	4,2	4,5
Средний ток ионов, приведенный к вакууму $2,2 \times 10^5$ мм Hg (мка)	2,5	6,5	14,5	19,5

Из таблицы 3 видно, что на У-150 не имеет смысла делать эмиссионную щель источника более 20 мм. Хотя и имеется еще некоторый рост тока с более длинной щелью, но при этом требуется большой расход газа, что приводит к ухудшению вакуума в камере циклотрона. Плохой вакуум уменьшает электрическую прочность циклотрона и увеличивает потери ионов на рассеяние и перезарядку.

II. Для выяснения влияния вакуума на ток МЗИ в циклотроне к ионному источнику была прикреплена еще одна тонкая трубка, по которой в область центра циклотрона (вблизи газоразрядной камеры источника) подавался такой же газ (в данном случае воздух), как и в источник. Изменение подачи газа во внешнюю трубку на режиме работы источника не сказывалось. Ускорялись ионы O_{16}^{+5} . Результаты влияния вакуума на ток МЗИ показаны на рис. 4.

Из рисунка видно, насколько важно иметь хороший вакуум при ускорении многозарядных ионов.

III. Исследовался выход МЗИ в зависимости от рода газа, подаваемого в ионный источник. Для каждого газа подбирался оптимальный режим работы источника по максимуму тока на коллектор. Результаты сведены в таблицу 4.

Т а б л и ц а 4

		Вид газа, подаваемого в источник				
	Ускоряемый ион	Воздух	CO ₂	CH ₄	Азот	Кислород
Сред- ний ток ионов (мкА)	C ⁺⁴ ₁₂	12	17	21	-	-
	N ⁺⁵ ₁₄	3	-	-	2,5	-
	O ⁺⁵ ₁₆	13	10	-	-	17

Как видно из таблицы, ток ионов N⁺⁵₁₄ получается больше при подаче в ионный источник воздуха, а не чисто-технического азота. Такое же соотношение наблюдалось и в работе /8/. Непонятно также, почему ток ионов O⁺⁵₁₆ получается большим из воздуха, чем из CO₂. Столь большое количество ионов C⁺⁴₁₂, получаемых при подаче в источник воздуха, в сравнении с теми случаями, когда подается CO₂ или CH₄, вероятно, объясняется тем, что в объеме циклотрона имеется большое количество паров диффузионного масла, из диссоциированных молекул которого и образуются ионы углерода.

IV. Дальнейшие исследования на У-150 проводились в направлении определения оптимального режима источника по основным параметрам разряда, влияющим на выход МЗИ:

- а) мощность в разряде,
- б) мощность подогрева катода,
- в) расход газа.

Опыты этой серии измерений на У-150 проводились таким же образом, как и на У-300. При ускорении ионов Ne⁺⁶₂₀ на пробнике перед коллектором помещалась фольга из алюминия толщиной 15 мк, с помощью которой поглощались ионы Ne⁺²₂₀, ускоряющиеся на третьей гармонике. Ниже приводятся кривые зависимости выхода различных ионов от перечисленных параметров (рис. 5, 6, 7). Здесь также токи ионов даны в относительных единицах и соотношения между максимумами токов не в масштабе.

Обсуждение результатов

Из рис. 3 и 7 видно, что для получения максимального количества МЗИ необходимо расход газа уменьшить до минимума, пока не наступает срыв дуги. Иногда имеется максимум на кривой при малых количествах газа.

Для получения максимального тока ионов Ar_{40}^{+7} и Ar_{40}^{+8} необходима точная дозировка расхода газа.

Сравнивая минимальные количества расхода газа, при которых еще не наступает срыв дуги, легко заметить, что чем тяжелее ионы в разряде, тем меньше в нем давление, необходимое для поддержания устойчивого разряда. Качественно это согласуется с выражением, связывающим ток разряда с давлением в нем [9],

$$p \mathcal{P}(j_0) = \beta \cdot \sqrt{m_e / m_i} \cdot j_0, \quad (1)$$

где p - давление, β - коэффициент, зависящий от геометрии, коэффициента диффузии и температуры газа, а $\mathcal{P}(j_0)$ - вероятность ионизации

$$\mathcal{P}(j_0) = 1 - \exp(-j_0 \sigma_i t), \quad (2)$$

где σ_i - сечение ионизации, t - время пребывания молекулы газа в колонне разряда.

На рис. 1 и 5 показана зависимость тока МЗИ от мощности в дуге. Видно, что все кривые имеют максимум при определенной мощности разряда. Ширина максимума различна для разных ионов, крутизна подъема и спада кривой также неодинакова. Место положения максимума на кривой и ее форма могут быть несколько иными для разных источников. Они могут отличаться даже для одного и того же источника в зависимости от времени работы источника. Обычно для мало работавшего источника крутизна подъема и спада кривой меньшая, чем для источника, проработавшего больше половины срока службы. Полное время работы определяется скоростью распыления катода, которая зависит не только от мощности в разряде, но и от газа, подаваемого в источник [10]. Так, при работе на благородных газах срок службы источника значительно сокращается (при работе на аргоне источник живет в 1,5-2 раза меньше, чем на воздухе).

На рис. 2 и 6 показана зависимость выхода МЗИ от мощности подогрева катода. Кривые выхода ионов C_{12}^{+4} , N_{14}^{+5} , O_{16}^{+5} иногда имеют максимум, после которого наблюдается слабый спад интенсивности, а иногда, начиная с некоторой мощности подогрева, наступает постоянство выхода МЗИ. Для ионов Ne_{20}^{+4} , Ne_{20}^{+8} , Ar_{40}^{+7} , Ar_{40}^{+8} всегда имеется максимум выхода в зависимости от мощности подогрева. При этом для ионов аргона полуширина пика значительно меньше, чем для других ионов. Ширина пика и место положения максимума для данного иона зависит как от индивидуальной сборки источника, так и от времени работы данного источника. На рис. 2 кривая (1) была снята на источнике, катод которого работал только 3 часа и имел плохой тепловой контакт с держателем катода. Этот источник мог работать даже без подогрева катода. Кривая (2) снята на источнике, катод которого имел хороший теплоотвод и проработал 9 часов. При изменении мощности подогрева в пределах полуширины кривой напряжение и ток дуги меняется менее чем на 5%. Поэтому на основании кривых

рис. 1, нельзя объяснить такой резкий максимум столь незначительным изменением напряжения и тока в дуге. По-видимому, здесь играет роль какой-то другой механизм ионообразования, отличный от обычного, наблюдаемого при получении всех других ионов.

Токи различных многозарядных ионов, полученные с помощью исследованных источников и ускоренные на ускорителях ОИЯИ У-150 и У-300, приведены в таблице 5.

Т а б л и ц а 5

Ускорители	У-300					У-150			
	Ar_{40}^{+7}	Ar_{40}^{+8}	Ne_{20}^{+4}	Ne_{22}^{+5}	Ne_{20}^{+6}	Ne_{20}^{+7}	C_{12}^{+4}	N_{14}^{+5}	O_{16}^{+5}
Средний ток ионов (мкА)	5,0	0,8	100	≈ 1	1,2	≈ 0,01	50	20	20
Газ, подаваемый в источник	Аргон		Неон (естественный)			CH_4	воздух	O_2	

Указанные токи измерялись на У-300 и У-150 при положении пробника на радиусах 100 и 50 см соответственно.

Из приведенной таблицы видно, что ток ионов семизарядного аргона сравним с током пятизарядного неона (если учесть концентрацию Ne_{22} в естественной смеси), ток восьмизарядного аргона сравним с током шестизарядного неона.

В работе ^{/7/} предполагается, что при образовании многозарядных ионов легких газов (азота, кислорода и др.) основную роль играет ступенчатая ионизация в дуговом источнике.

Из сравнения токов ионов аргона, полученных на ускорителе У-300, с токами других ионов, можно предположить, что в случае более тяжелых атомов, помимо ступенчатой ионизации, играет весьма существенную роль и другой механизм ионообразования, когда с атома одновременно срывается несколько электронов. Такой путь образования многозарядных ионов рассматривается Д.А. Киржницем ^{/11/}.

Из его работы следует, что в атомах, имеющих несколько электронных оболочек, возможно существование коллективного возбуждения электронов. Задача о коллективных колебаниях тяжелого атома рассматривается также несколько ранее и в другой работе ^{/12/}.

Расчеты, сделанные Д.А. Киржницем, показывают, что для коллективных коле-

баний атомов вероятнее всего ожидать появления лишь одного уровня с энергией, равной $\Delta E = 1,41 \omega_L = 20 Z$ эв, где ω_L - ленгмюровская частота, Z - число электронов в атоме.

Наличие коллективного уровня атома может привести к следующему (о возможности существования коллективных колебаний в атоме говорится также в небольшой заметке /13/, где указывается, что частота таких колебаний $\omega_L \approx Z$). Резонансный электрон (рентгеновский квант) может передать свою энергию сразу многим электронам атома, переводя последний в сравнительно долгоживущее возбужденное состояние. Распад этого состояния может идти по различным-упругим или неупругим-каналам. В частности, возможно выбрасывание "сгустка", состоящего из нескольких электронов. Причем с ростом заряда ядра сечение ионизации одинаковой кратности будет увеличиваться. Отношение соответствующих сечений для разных атомов быстро увеличивается с ростом зарядности иона. Это указывает на предпочтительное выбрасывание больших "сгустков" /14,15/.

Авторы выражают благодарность Г.Н. Флерову за внимание к работе с ионными источниками и постановку ряда задач.

Мы весьма признательны Д.А. Киржицу, П.М. Морозову и Б.Н. Макову, принимавшим участие в обсуждении полученных результатов. Пользуясь случаем, благодарим операторов циклотронов за помощь при проведении экспериментов. Особо благодарим В.Станку за помощь во время работы на У-150.

Л и т е р а т у р а

1. А.С. Пасюк, И.А. Шелаев, Го Ци-пянь, Ю.П. Третьяков. Препринт ОИЯИ 924 Дубна 1962; ПТЭ, № 5, 23, 1963.
2. Б.А. Загер, Г. Индреш, В.Г. Тишин, И.А. Шелаев. ПТЭ, № 2, 20 (1963).
3. Г. Индреш. Диссертация. Ускорение многозарядных ионов на циклотронах. Дубна, ОИЯИ, 1963.
4. А.А. Курашов, А.Ф. Линева. ПТЭ, № 2, 70 (1957).
5. В.В. Бредель, В.Л. Михеев, С.М. Поликанов. ПТЭ, № 6, 44 (1961).
6. Х. Кекк, В.Л. Михеев, А.А. Плеве, Б.В. Фефилов. ПТЭ, № 4, 27 (1963).
7. Ю.Д. Пигаров, П.М. Морозов. ЖТФ, т. XXXI, вып. 4, 476 (1961).
8. R. Basile et J.M. Lagrange, J. Phys. Rad., 23, juin, p. IIIA (1962).
9. A. Guttrie and R.K. Wakerling. (The characteristics of electrical discharges in magnetic fields, p. 87) McGraw Hill Book Comp, JNC, 1949.
10. O. Almen, G. Bruce. Nucl. Instr., Meth., II, № 2, 257 and 279 (1961).

11. Д.А. Киржиц. Полевые методы теории многих частиц, Госатомиздат, Москва, 1963.
12. В.Н. Алямовский, Д.А. Киржиц. Труды Второго Всесоюзного совещания по квантовой химии. Литовский физический сборник ; III , № 1-2. Вильнюс, Гос. изд-во полит. и научн. лит. Лит. ССР, 1963.
13. W.Brandt and S. Lundqvist. Phys. Letters, v. 4, 1, 47 (1963).
14. R.E. Fox. Advances in Mass Spectrometry. Perg. Press, London, p. 397 ff, 1959.
15. R.E. Fox. J. Chem. Phys., 33, 200 (1960).

Рукопись поступила в издательский отдел
3 января 1964 г.

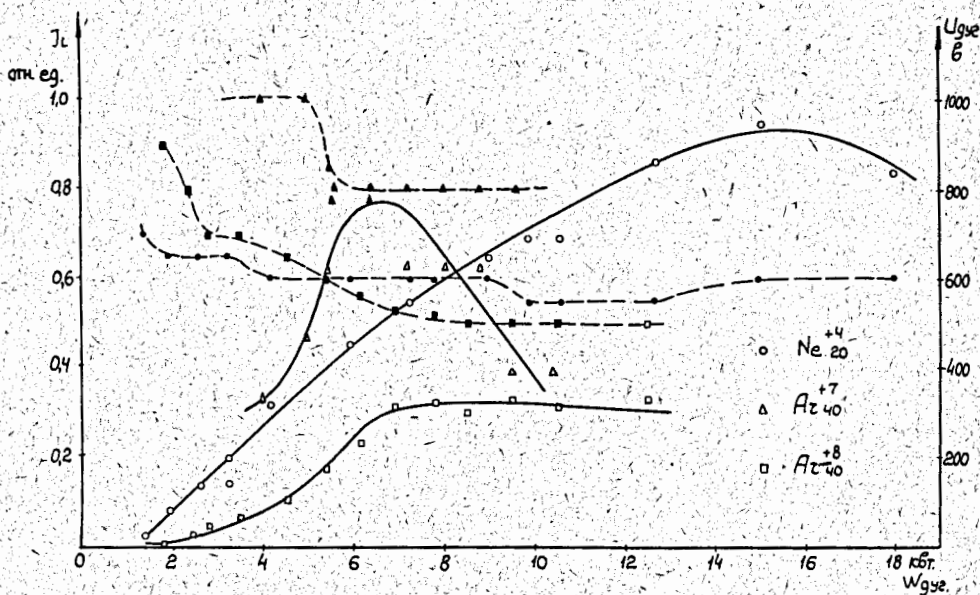


Рис. 1. Зависимость тока ионов Ne^{+4} , Ar^{+7} , Ar^{+8} от мощности в разряде. Пунктирными линиями отмечено изменение напряжения на дуге; шкала напряжений - правая вертикальная ось.

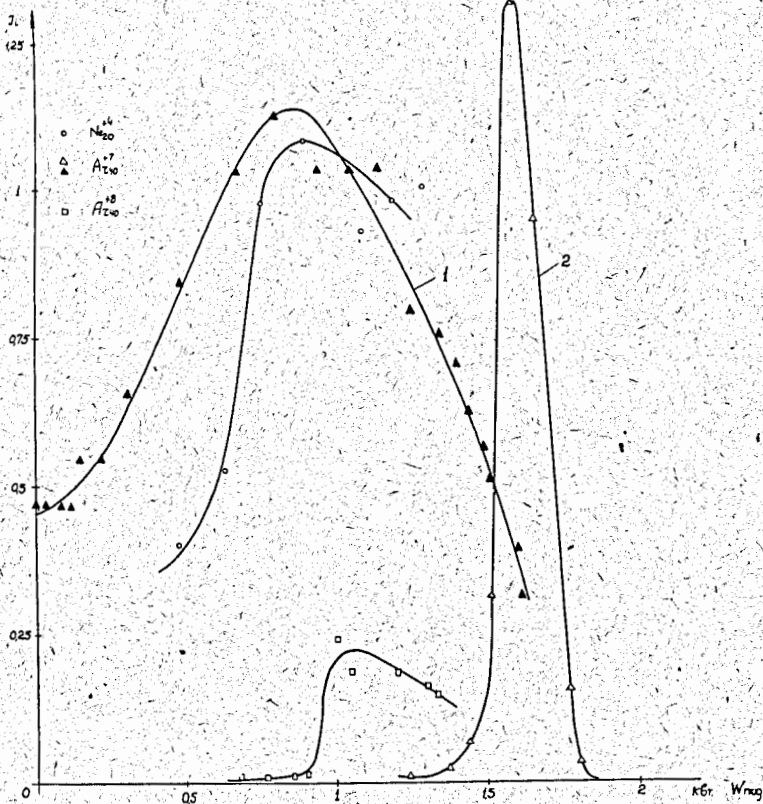


Рис. 2. Зависимость тока ионов Ne^{+4} , Ar^{+7} , Ar^{+8} от мощности подгрева катода.

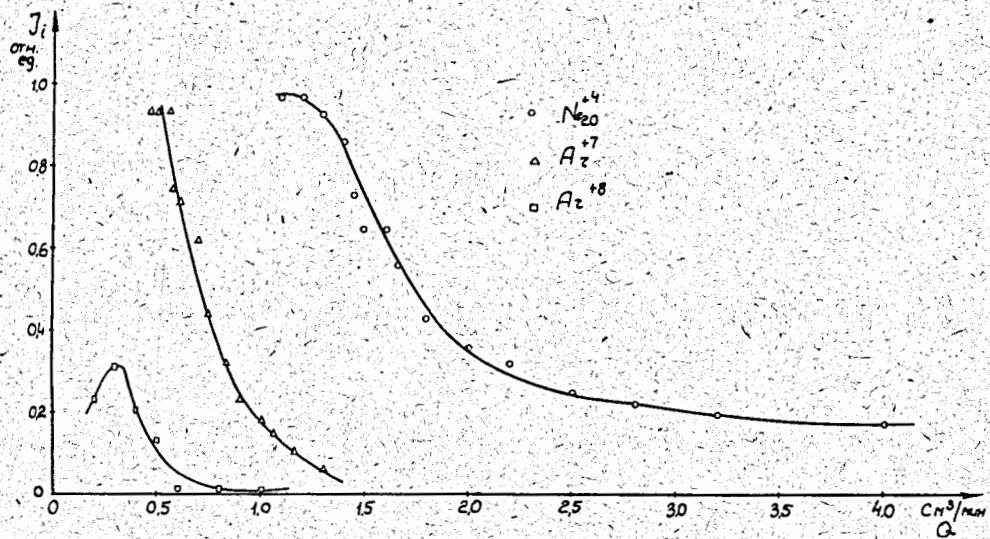


Рис. 3. Зависимость тока ионов Ne^{+4} , Ar^{+7} , Ar^{+8} от расхода газа в единицу времени.

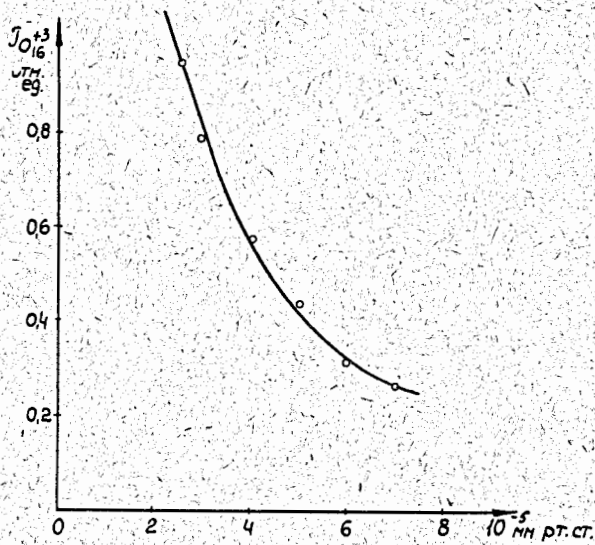


Рис. 4. Зависимость тока ионов O_{16}^{+5} от вакуума в камере циклотрона У-150.

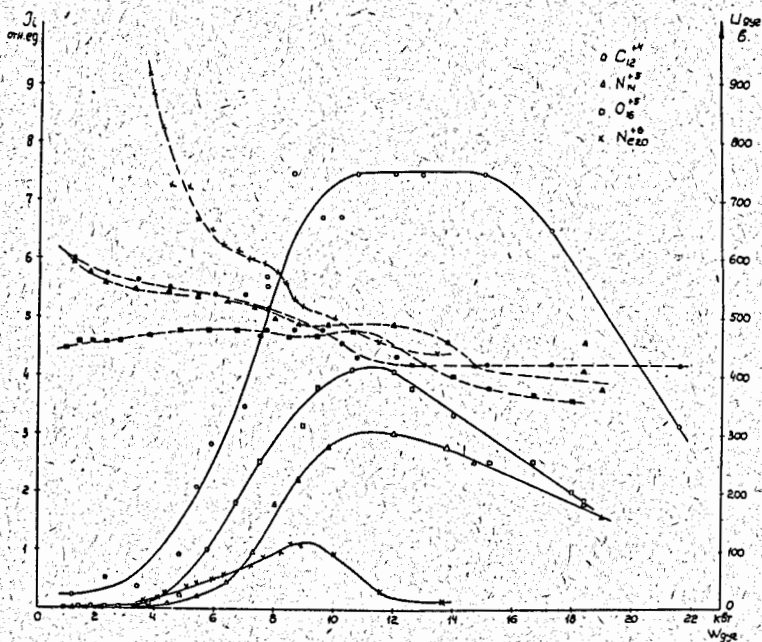


Рис. 5. Зависимость тока ионов C_{12}^{+4} , N_{14}^{+5} , O_{16}^{+5} и Ne_{20}^{+6} от мощности в разряде.

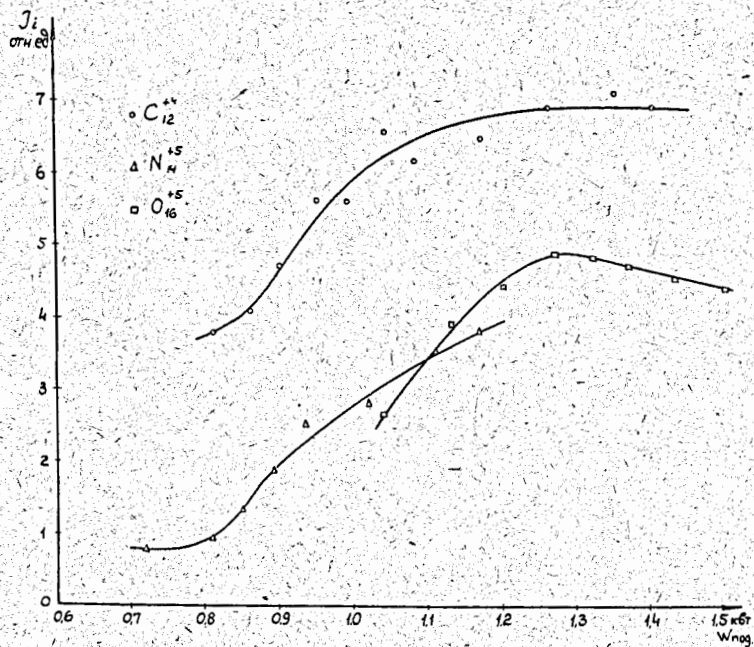


Рис. 6. Зависимость тока ионов C_{12}^{+4} , N_{14}^{+5} , O_{16}^{+5} от мощности подогрева катода.

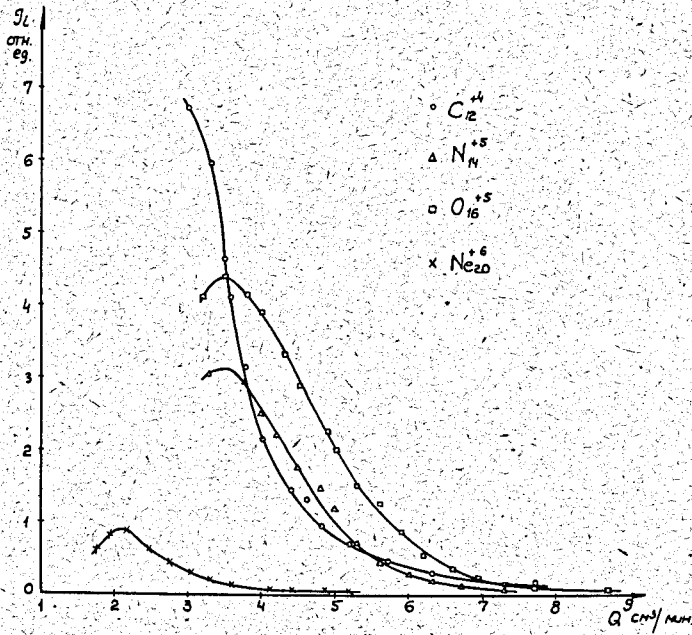


Рис. 7. Зависимость тока ионов C_{12}^{+4} , N_{14}^{+5} , O_{16}^{+5} и Ne_{20}^{+6} от расхода газа в единицу времени.