

ИСТОЧНИК ФЕМТОАМПЕРНЫХ ПУЧКОВ ПРОТОНОВ

В.Н. Черник, В.П. Петухов

vlachernik@yandex.ru, +79067976289

НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

Исследования энергетических спектров протонов в верхней атмосфере Земли производятся бортовыми анализаторами на космических аппаратах. Для их калибровки в лабораторных условиях применяются источники и ускорители заряженных частиц, формирующие пучки протонов в широком диапазоне энергий от десятков эВ до десятков кэВ. Обычный путь генерации протонных пучков включает операции ионизации разреженного водород-содержащего газа фотонным или электронным ударом, фильтрацию полученной смеси ионов по массе, формированию протонного пучка. Эти же операции используются и в анализаторах масс-спектрометров. Для предотвращения перегрузки вторично-электронных умножителей детекторов частиц калибровочные пучки должны иметь низкую интенсивность в диапазоне от фемто- до пикоампер. Такие же ионные токи характерны и для работы масс-спектрометров разреженных газов. Исходя из этих общих особенностей методов генерации ионных пучков и масс-спектрометрии представляет интерес выполнение калибровочного источника протонов на основе стандартного масс-спектрометрического анализатора, выпускаемого промышленностью.

В данной работе за основу источника выбран анализатор легких масс (1-4 а.е.м.) радиочастотного масс-спектрометра марки МХ-6407П типа Беннета. Этот масс-спектрометр широко использовался в ракетных экспериментах по зондированию земной атмосферы. В свое время был произведен достаточно большой запас приборов. В организациях сохранилось некоторое количество неиспользуемых приборов. В теперешних реалиях анализатор типа А1 даже появился в сети Интернет по цене 5000 руб/шт.

Внешний вид анализатора легких масс и электрометрической головки показан на рис. 1.

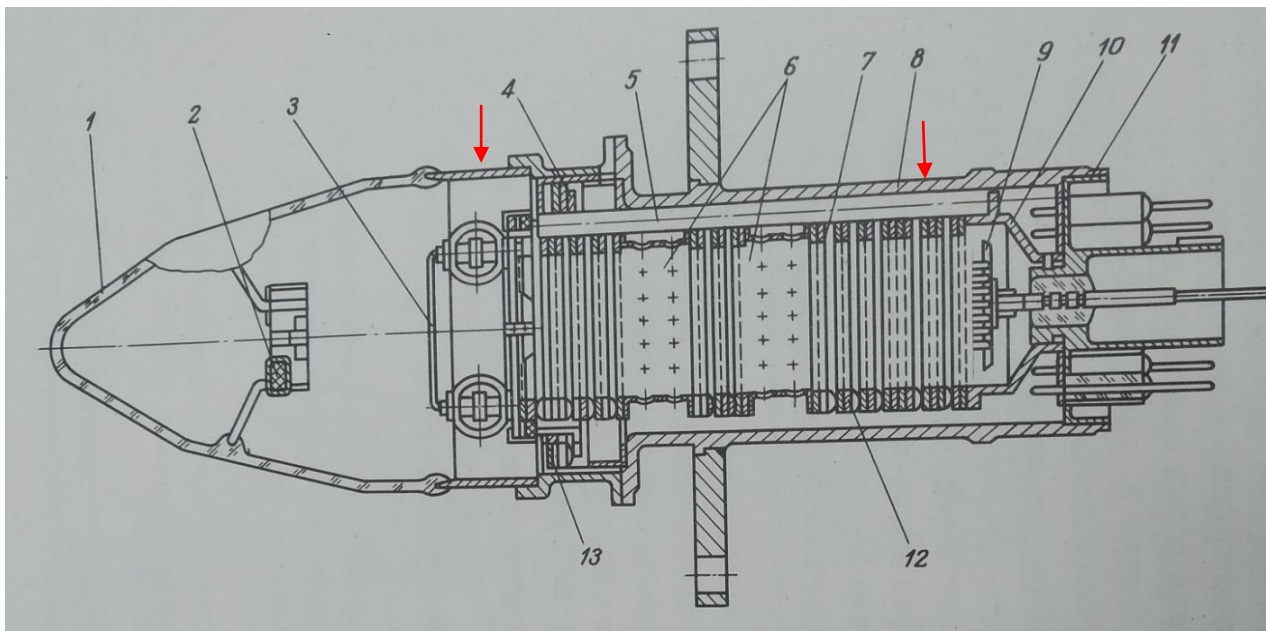
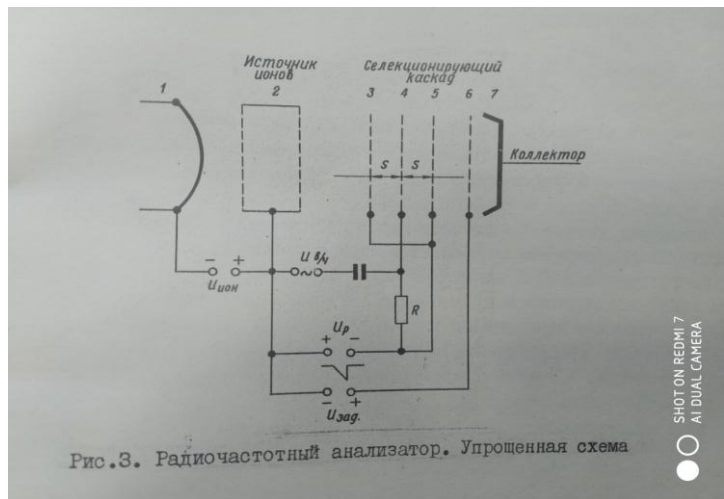


Принцип действия заключается в ионизации молекул рабочего газа ускоренными электронами, испущенными термоэмиссионным катодом с последующим выделением ионов нужной массы, на основе избирательного действия трехсеточных каскадов с высокочастотным полем, пропускающих только ионы, движущиеся с синхронной скоростью, определяемой ускоряющим напряжением развертки и атомной массой иона. Упрощенная схема однокаскадного анализатора показана на рис.2. На три плоскопараллельные сетки 3, 4, 5 селекционирующего каскада подается отрицательное ускоряющее ионы напряжение развертки U_p , а на среднюю сетку 4, кроме того, относительно небольшое напряжение высокой частоты $U_{вч}$. Положительные ионы анализируемого газа, образованные в ионизационной камере 2 источника ионов электронами с катода 1, ускоряются напряжением развертки до одинаковой энергии, но разной скорости, зависящей от массы. В ВЧ поле они набирают максимальную энергию, если проходят каскад за 0,74 периода, чему соответствует определенная скорость (синхронная). Задерживающая сетка 6 с достаточным положительным потенциалом $U_{зад}$ пропустит на коллектор 7 только синхронные ионы, скорость которых определяется энергией eU_p , частотой ВЧ и расстоянием s между сетками. Ионный ток коллектора регистрируется усилителем, размещенным в электрометрической головке, при-

соединенной к анализатору цоколем. Через цоколь подаются на электроды анализатора питающие напряжения, в том числе и ВЧ колебания 15 МГц, формируемые генератором, установленным в электрометрической головке.

Схема конструкции анализатора в разрезе показана на рис. 3.

Корпус анализатора спаян с защитным стеклянным баллоном 1, содержащим титано-циркониевый газопоглотитель 2. При использовании в космосе баллон срезается разбивающим устройством.



Внутри баллона установлен термокатод, окружающий камеру ионизации 3, далее внутри корпуса 8 располагается многосеточная система ускорения ионов и селекции протонов (4-фиксатор, 5-стержни центровки, 6-трубы дрейфа, 7-кольца с сетками), заканчивающаяся коллектором ионов 9 с экраном 10. На торце имеется цоколь 11 для соединения с электрометрической головкой, регистрирующей ионы. Газопоглотитель при хранении и настройке поддерживает в запаянном анализаторе А1 контрольную среду из водорода и гелия. В рабочем режиме на борту ракеты баллон срезается разбивающим устройством и анализируется окружающая атмосфера. При использовании в наземных экспериментах в вакуумной среде анализатор предварительно разгерметизируется. Для обеспечения ремонтпригодности катодного узла баллон отрезается по коваровой трубе, соединяющей его с корпусом в месте, отмеченном на рис. 4 стрелкой.

Для преобразования данного анализатора масс-спектрометра в источник ионов необходимо обеспечить вывод протонов из анализатора наружу. Для этого его конструкция была изменена следующим образом: штатный коллектор ионов с цоколем и электрометрическая головка удаляются. Место разреза показано на рис.3. В анализаторе после отделения цоколя провода, выходящие из корпуса присоединяются к выходному кабелю, на корпус устанавливается плата с ВЧ генератором как видно на рис.4.

Коллектор и электрометрическая головка заменяются приемником ионов с кольцевым электродом и микроэлектронным электрометрическим усилителем. ВЧ генератор вынесен из головки и расположен непосредственно на корпусе анализатора, оксидный катод заменен вольфрамовым из проволоки большего диаметра -100 мкм.

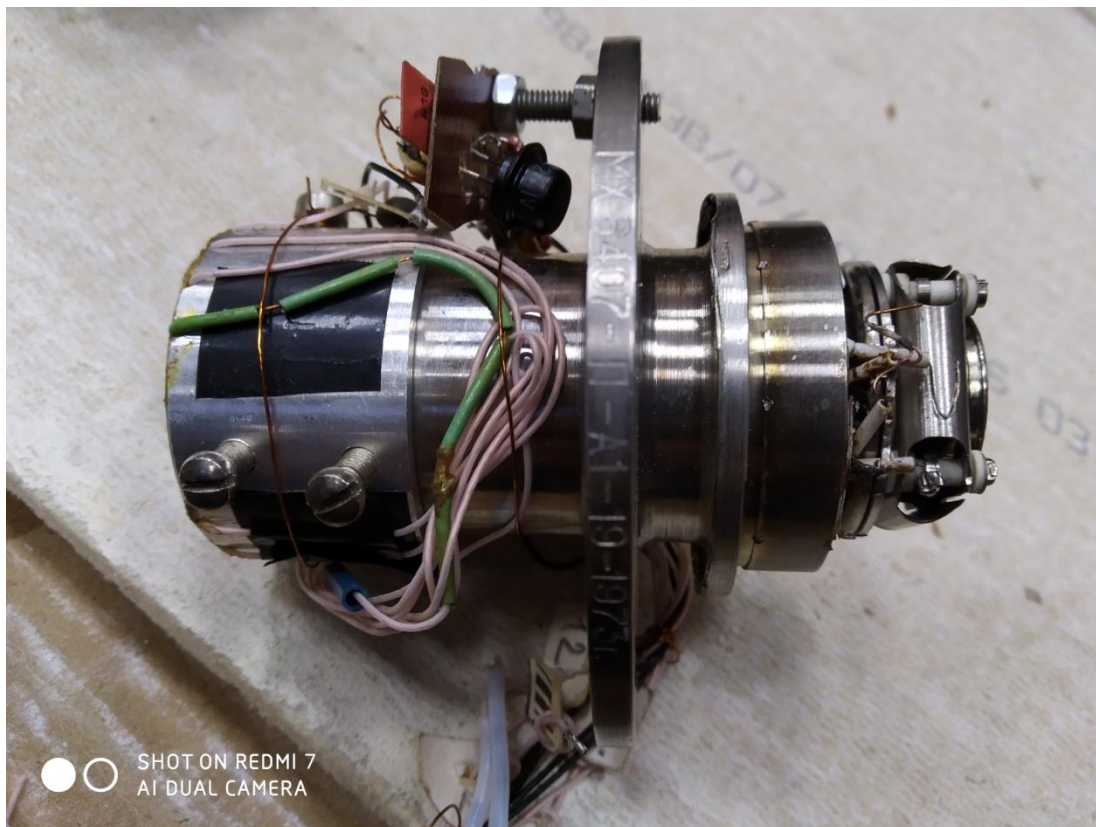


Рис.4. Источник протонов перед установкой приемника ионов. Справа от фланца катодный узел и камера ионизации, слева плата генератора и выходной кабель.

Приемник ионов содержит электрометрический усилитель, присоединенный к кольцевому электроду. Электрод выполнен в виде диска диаметром 25 мм с центральным отверстием диаметром 5 мм, через которое выходит протонный пучок. Приемник размещен в плоском корпусе из жести с входным отверстием диаметром 20 мм, закрытом антиэлектронной сеткой с отрицательным потенциалом. Сзади электрода установлена выходная трубка с внутренним диаметром 5 мм для выпуска пучка протонов, вышедшего из отверстий электрода. Ионный ток I_c на электрод измеряется электрометрическим усилителем с входным сопротивлением $R=10^{12}$ ом, выполненным на операционной микросхеме с ультранизким входным током типа LMC 6042. Выходное напряжение равно произведению $U_{out} = I_c R$. Микросхема усилителя размещена внутри корпуса приемника, так же как и измерительный резистор R . Кольцевой приемный электрод припаян в двух точках непосредственно на их выводах для исключения применения специальных опорных и проходных изоляторов, увеличивающих утечку входного тока. Выходной протонный пучок образуется из потока на кольцевой электрод при выходе из отверстия в нем и прходе по выходной трубе. Поэтому непрерывный контроль выходного тока может производиться по величине тока на электрод по градуировочной характеристике.

Схема экспериментальной установки для снятия градуировочной характеристики показана на рис.5. Вакуумная камера (1) откачивалась криогенным насосом (2) типа SA16 SPACETORR фирмы Sudsuki Shokan (Япония) с быстротой действия $5 \text{ м}^3/\text{с}$. Контроль давления в камере производился по показаниям вакуумметров (3) ВИТ-2 и СС-10. Контроль за работой вакуумного крионасоса производился по встроенному индикатору температуры криопанели согласно инструкции фирмы-производителя.

Источник (4) протонов со встроенным приемником (5) ионов размещался внутри камеры на изоляторах для гальванической развязки от корпуса установки. Корпус встроенного в источник протонов приемника ионов соединен с корпусом установки и закреплен на корпусе источника протонов на изоляторах. Блок (6) питания источника протонов располагался снаружи в диэлектрическом футляре для изоляции от корпуса установки. С помощью источника (7) высокого напряжения между источником протонов и корпусом приемника поддерживается разность потенциалов в диапазоне $0 -5 \text{ кВ}$, необходимая для сообщения выходящим из источника прото-

нам заданной энергии. Для получения протонов в источник из сосуда (8) подавался рабочий газ, при ионизации которого образуются протоны. Регулирование расхода газа осуществлялось натекателем (9). В качестве рабочего газа выбраны пары воды, образующиеся при испарении жидкой фазы в сосуде (8). Преимущество в такой среде перед газообразным водородом состоит в том, что в этом случае ближайших к протонам по массе ионов молекулярного водорода образуется мало, а остальные компоненты (16 а.е.м., 17 а.е.м., 18 а.е.м.) отстают далеко по шкале масс, что уменьшает уровень помех. Другое преимущество состоит в постоянстве давления в сосуде над водой в жидкой фазе, которое равно давлению насыщенных паров. Это упрощает поддержание постоянства потока рабочего газа в источник.

Ток I_b пучка является частью тока I_c ионов на коллектор, измеряемого электрометрическим усилителем приемника по падению напряжения U_{out} на измерительном сопротивлении величиной $R=10^{12}$ ом, включенном в цепь обратной связи усилителя. Ток I_b пучка связан с током I_c ионов на коллектор и напряжением U_{out} соотношением

$$I_b = I_c * k = U_{out} * k / R = U_{out} * k / 10^{12} . \quad (5.1)$$

Полученное соотношение (5.1) является искомой градуировочной характеристикой, по которой при использовании источника определяется ток I_b протонов по величине напряжения U_{out} на выходе приемника. При измерении тока в фА, а напряжения в мВ градуировочная характеристика принимает вид $I_b = U_{out} * k$. (5,2)

В данных испытаниях определялась градуировочная зависимость тока I_b от выходного напряжения U_{out} приемника и значения градуировочного коэффициента k . Регулирование тока ионов на коллектор приемника осуществлялось путем изменения тока эмиссии катода (2-100 мка) и/или давления газа в камере ионизации источника. Первое производилось регулировкой тока накала катода, а второе путем управления потоком газа натекателем.

Настройка источника на получение пучка протонов. Согласно уравнения радиочастотного масс-анализатора для получения пучка протонов необходимо установить напряжение развертки около 60 В и настроить его на максимум сигнала на выходе. Результаты настройки источника при изменении напряжения развертки приведены на рис.6. Как видно из графика появление пика максимума выходного напряжения и тока пучка наблюдается при напряжении развертки 66 В, что приблизительно соответствует расчетному значению по уравнению масс-спектрометра для ионов с единичной атомной массой. Таким образом на выходе источника регистрируется поток протонов. Для выделения молекулярных ионов H_2 , обладающей ближайшей по шкале массой $M=2$, следует настраивать величину $U_p = 157$ В.

Определение начальной энергии протонов. Ионы, проходя сквозь селекционирующую систему сеток, ускоряются ВЧ полем. Для выделения синхронных ионов, набравших максимальную энергию, на специальную последнюю по ходу сетку анализатора подается фиксированный потенциал задержки +70 В. На выход сквозь сетку проходят только ионы с более высокой энергией. На Рис.7 приведена зависимость выходного напряжения испытываемого источника протонов, снятая при изменении потенциала задержки от внешнего источника напряжения. Из графика видно, что энергия протонов после ускорения в сеточных каскадах лежит в пределах 39-87 эВ. На выход проходят протоны с энергией в диапазоне 70 -87 эВ, преодолевающие потенциал задержки. В этом интервале лежит начальная энергия протонов. Далее этот поток протонов доускоряется разностью потенциалов смещения между анализатором и корпусом приемника ионов в диапазоне 0-5 кВ.

Определение градуировочных характеристик источника протонов. Путем изменения тока накала катода и расхода газа изменялись ток ионов на коллектор приемника и его выходное напряжение. При этом проводилось измерение тока пучка. Измерения проводились при различных потенциалах смещения, определяющих энергию протонов, выходящих из выходного отверстия приемника ионов источника. Полученные градуировочные характеристики приведены на Рис.8, 9. Как видно из графиков, характеристики линейны. При изменении выходного напряжения и тока коллектора от 50 до 1800 ед. ток пучка изменяется от 5 до 120 фА. Величина потока протонов регулируется в пределах от $3 \cdot 10^4$ –до $6 \cdot 10^5$ протонов./ с. Градуировочный коэффициент изменяется в зависимости от потенциала смещения. При приложении смещения коэффициент лежит в пределах $k = 0,057-0,0726$ фА/мВ.

Выводы

Источник протонов формирует поток протонов в диапазоне от $3 \cdot 10^4$ – до $6 \cdot 10^5$ протонов./ с, что соответствует токам 5-120 фА.

В указанных пределах регулировка потока производится изменением тока накала катода и/или расхода газа.

Энергия протонов регулируется в пределах 0,07-5 кэВ приложением потенциала смещения к корпусу источника.

Поток протонов контролируется по величине выходного напряжения приемника ионов источника (току коллектора ионов) с использованием градуировочных графиков и коэффициентов.

Градуировочные графики линейны, градуировочные коэффициенты лежат в пределах $k = 0,057$ - $0,073$ фА/мВ при потенциалах смещения от 0,3 до 5 кВ. При отсутствии смещения коэффициент $k = 0,0137$ фА/мВ.

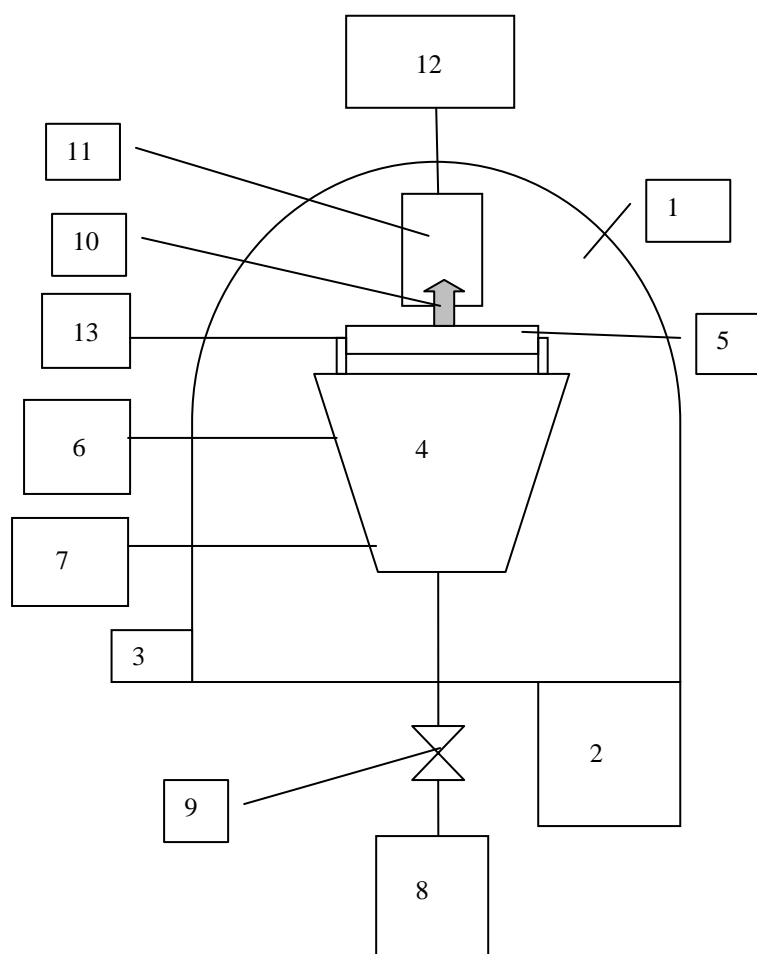


Рис.5. Блок схема экспериментальной установки.

1- Вакуумная камера, 2- криогенный насос, 3-вакуумметры, 4-источник протонов, 5-приемник ионов, 6-блок питания источника протонов, 7-источник высокого напряжения смещения и электростатический вольтметр, 8-сосуд с двухфазной водой, 9-регулируемый вентиль-нагреватель, 10-пучок протонов, 11-цилиндр Фарадея, 12-измеритель малых токов, 13-вольтметр для измерения выходного напряжения.

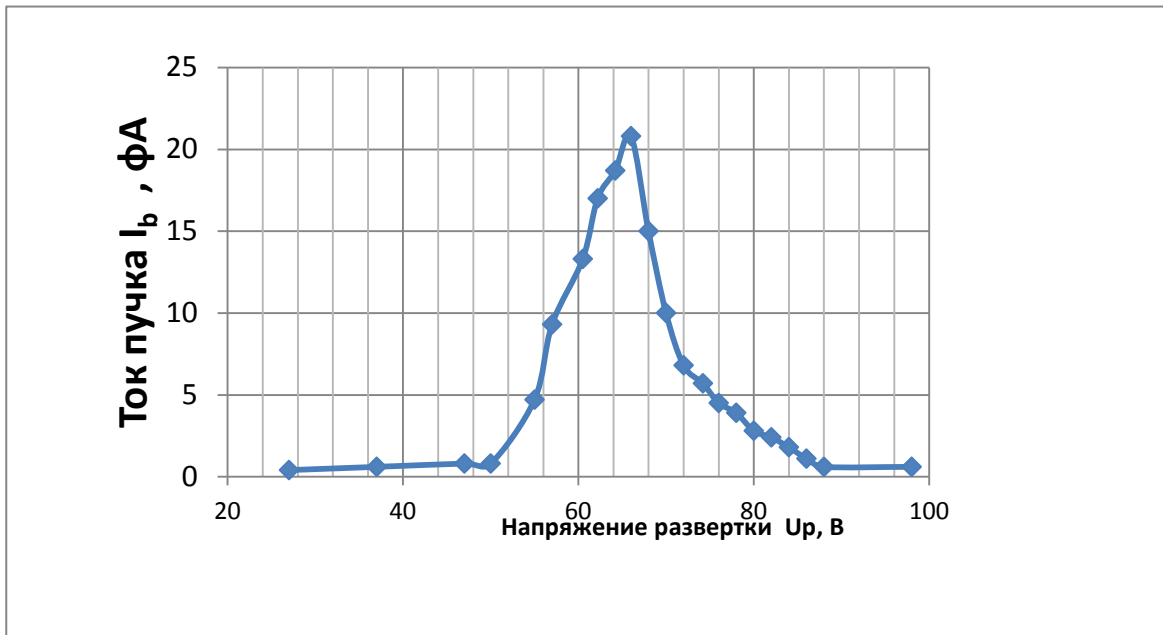


Рис.6. Зависимость тока пучка от напряжения развертки

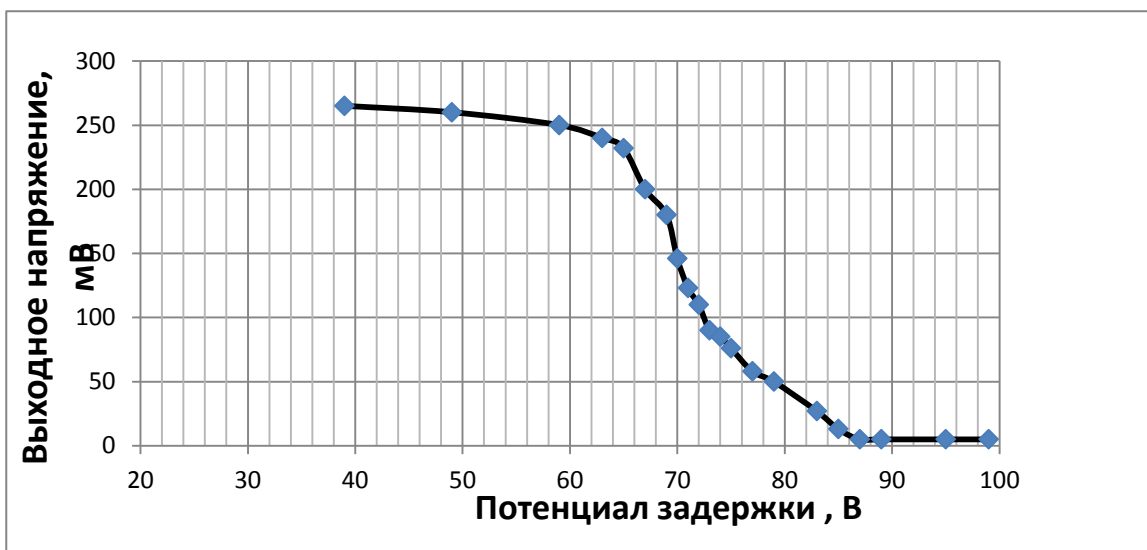


Рис.7. Зависимость выходного напряжения от потенциала на сетке задержки.

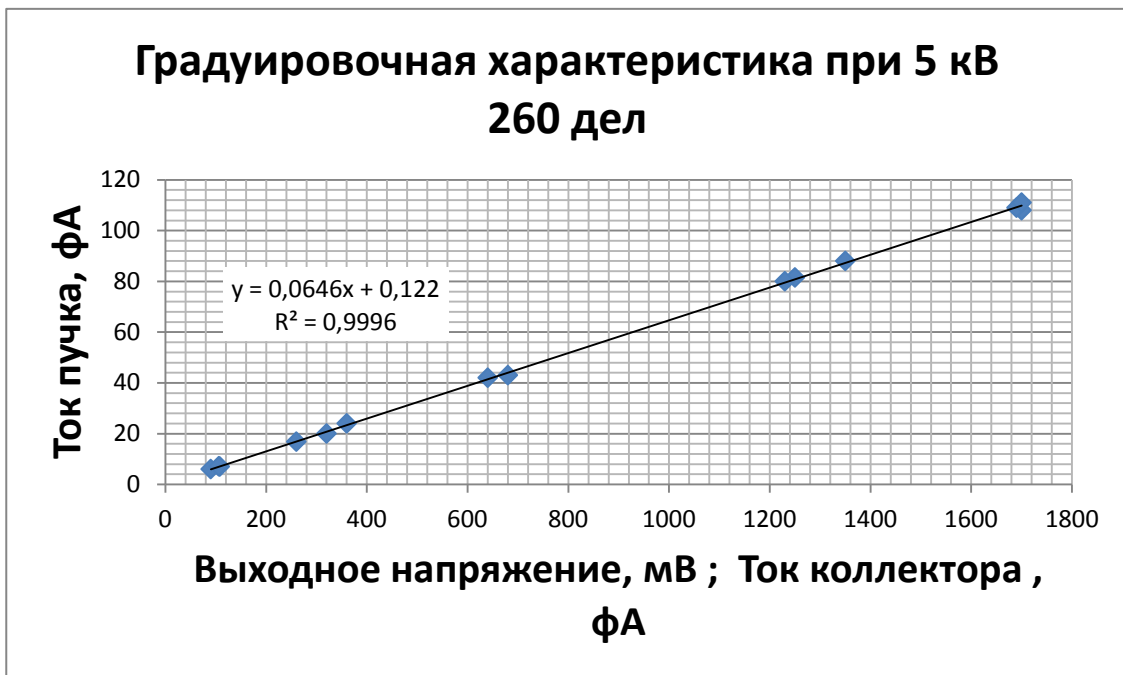


Рис.8. Градуировочная характеристика при потенциале смещения +5 кВ и показаниям шкалы натекателя 260 делений. Энергия протонов в пучке 5,07 кэВ. Изменение выходного напряжения и тока коллектора достигается регулировкой тока эмиссии электронов за счет тока накала катода. Градуировочный коэффициент $k=0,0646$.

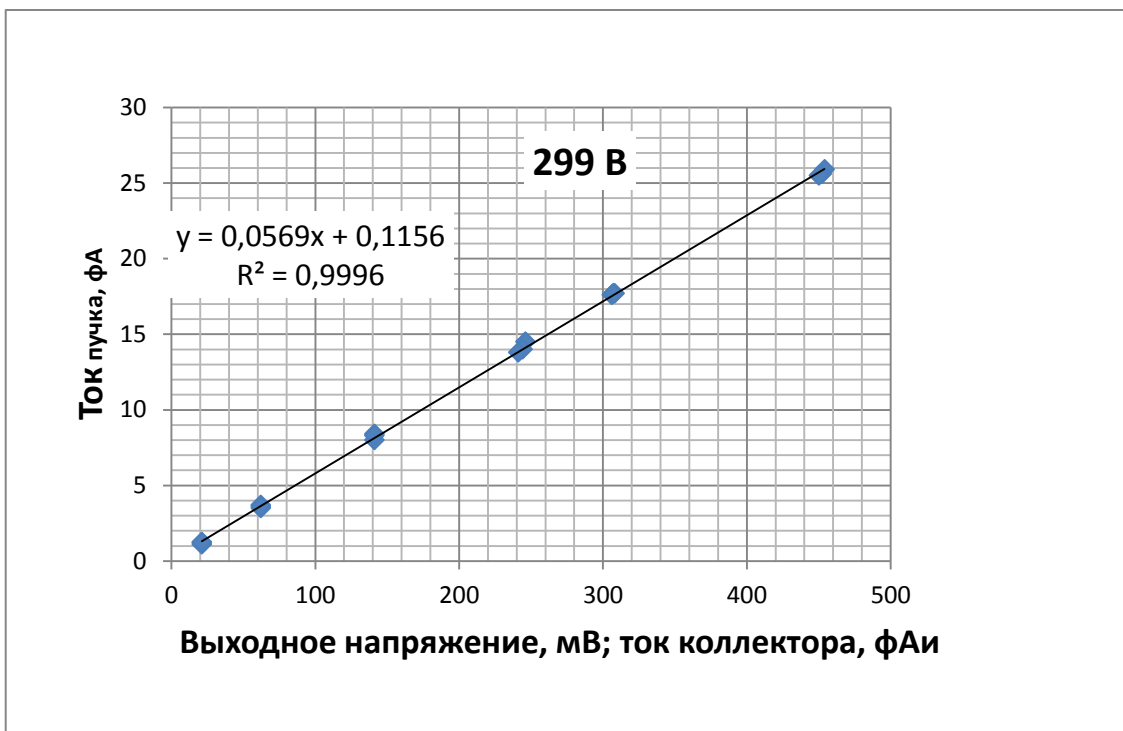


Рис.10. Градуировочная характеристика при потенциале смещения +299 В и показаниям шкалы натекателя 260 делений. Энергия протонов в пучке 376+-10 эВ. Градуировочный коэффициент $k=0,057$.