

26

**И Н С Т И Т У Т  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р**

препринт 319

Е.А.Абрамян, М.М.Бровин, В.В.Вечеславов

В.А.Горбунов, В.И.Кононов, И.Л.Черток

**СИЛЬНОТОЧНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ПРОТОНОВ**

НОВОСИБИРСК

1969



Е.А.Абрамян, М.М.Бровин, В.В.Вечеславов

В.А.Горбунов, В.И.Кононов, И.Л.Черток

## СИЛЬНОТОЧНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ПРОТОНОВ

### А Н Н О Т А Ц И Я

Описаны особенности расчёта и конструкции экспериментального ускорителя протонов трансформаторного типа. Для формирования и транспортировки протонного пучка использованы ионный источник с магнитно-электрической осцилляцией электронов и ускорительная трубка с электростатическими квадрупольными линзами.

Главная цель разработки ускорителя заключалась в проверке эффективности основных принятых конструктивных решений и применимости расчётных методик, изложенных в работах /2, 4, 5, 8, 10/ для получения интенсивных протонных пучков.

Экспериментально достигнутые величины максимального и среднего тока пучка при энергии 1,2 Мэв составили около 80 Ма и 9 Ма соответственно (длительность импульсов 2-5 мсек при частоте повторения 50 гц). Между опытными и расчётными значениями основных параметров ускорителя установлено удовлетворительное соответствие.

Полученные результаты могут быть использованы при разработках сильноточных инжекторов протонов и устройств ионной промышленной технологии.



Получение интенсивных пучков протонов с энергией несколько Мэв для физических исследований и различных прикладных целей может быть осуществлено с помощью ускорителей прямого действия на основе трансформатора /1/. При таком способе ускорения величины импульсного и среднего тока частиц в значительной мере определяются фокусирующими качествами трубки. Высокая интенсивность пучка может быть достигнута при условии успешного решения следующих возникающих при разработке ускорительного канала основных задач:

- 1) определение максимального пропускаемого ускорительной трубкой протонного тока и необходимых для его реализации условий входа пучка в ускорительный канал, 2) построение системы начального формирования пучка с требуемым током, извлекаемого из ионного источника, 3) обеспечение требуемых условий входа пучка в канал, т.е. разработка системы ионно-оптического согласования, 4) поведение в ускорительном канале вторичных частиц, в большой степени определяющее электрическую прочность трубки.

В последние годы были разработаны расчётные методики, посвященные решению перечисленных выше задач (см., например, /2, 4, 5, 8, 10/). Для проверки применимости этих методик и эффективности основных конструктивных решений был разработан и запущен экспериментальный ускоритель протонов ПрТ (протонный трансформатор), описанный ниже.

При токах в десятки и сотни миллиампер и энергии свыше 1 Мэв обычная аксиальносимметричная оптика ускорительного канала оказывается недостаточной и целесообразно применять жесткую фокусировку. В условиях, когда отсутствует предварительная сепарация ионного пучка по массам ионов удобно использовать электростатические квадрупольные линзы /3/.

При изучении движения интенсивного протонного пучка необходимо учитывать дефокусирующее влияние неупорядоченного теплового разброса поперечных скоростей частиц, мерой которого является величина поперечного фазового объема пучка  $V$  (см.рад.) /2/. Это означает, в частности, что огибающая пучка не является траекторией "крайней" частицы и гипотеза ламинарности потока не имеет места. Кроме того, высокий прирост энергии ускоряемых частиц, приходящийся на один элемент периодичности жесткофокусирующего канала не позволяет непосредственно применить известную теорию Флоке и вынуждает использовать специальные чис-



ленные методы расчёта.

Максимальный ток пучка  $I_{max}$ , захватываемый в режим ускорения, существенно зависит от величины фазового объёма и для выбора рабочего режима конкретной ускорительной трубки должна быть определена её пропускная характеристика  $I_{max} \cdot f(V)$  [2, 4]. В работе [4] показано, что построение этой характеристики проводится путем решения следующей системы уравнений (случай электростатических квадрупольных линз):

$$\frac{d^2 \delta_1}{ds^2} + \left[ \frac{g(s)}{\sqrt{2}\psi} + \frac{3}{16} \left( \frac{1}{\psi} \cdot \frac{d\psi}{ds} \right)^2 \right] \delta_1 - \frac{1}{\delta_1^3} = \frac{2\gamma}{v} \cdot \frac{1}{\psi} \cdot \frac{1}{\delta_1 + \delta_3} \quad (1)$$

$$\frac{d^2 \delta_3}{ds^2} - \left[ \frac{g(s)}{\sqrt{2}\psi} - \frac{3}{16} \left( \frac{1}{\psi} \cdot \frac{d\psi}{ds} \right)^2 \right] \delta_3 - \frac{1}{\delta_3^3} = \frac{2\gamma}{v} \cdot \frac{1}{\psi} \cdot \frac{1}{\delta_1 + \delta_3}$$

причём вектор  $\delta = [\delta_1, \delta_2 = \frac{d\delta_1}{ds}, \delta_3, \delta_4 = \frac{d\delta_3}{ds}]$

связан с вектором огибающих пучка

$$Y = [Y_1, Y_2 = \frac{dY_1}{ds}, Y_3, Y_4 = \frac{dY_3}{ds}]$$

соотношениями:

$$Y_i(s) = \delta_i(s) \cdot \left( \frac{v^2}{2\psi} \right)^{1/4}; \quad i=1,3. \quad (2)$$

Здесь  $S$  - координата вдоль оси трубки; все длины измеряются в долях произвольного размера  $l_0$  (м); для потенциала на оси  $\psi(s)$  тока  $J$  и градиента поля линзы  $g(s)$  приняты соответственно единицы измерения  $mc^2/e$

$4\pi\epsilon_0 mc^3/e$  (а) и  $mc^2/l_0^2 e$  (в/м<sup>2</sup>), где  $m, e$  - масса и заряд протона; относительный фазовый объём  $v = v/l_0$

Задание конкретных значений  $\eta = J/v$  и входного вектора  $\delta(0) = A$  определяет решение  $\delta(s, \eta, A)$  системы (1), а соотношения (2) позволяют построить скалярную функцию  $R(A)$ :

(3)

$$R(A) = \max_{0 \leq s \leq L} \left\{ \left[ \frac{Y_1(s)}{\sqrt{v}} \right]_{\max}, \left[ \frac{Y_3(s)}{\sqrt{v}} \right]_{\max} \right\}$$

$$\text{где } L \text{ - полная длина трубки.} \quad (3)$$

Для каждого значения  $\eta = J/v$  методом органи-

зованного поиска на ЭВМ отыскивается такое значение входного вектора  $\delta^*(0) = A^*$ , которое обеспечивает минимум функции

$R(A^*) = R_{min}$  по (3). Если  $r$  - максимальный поперечный размер канала, отведенный под некогерентные колебания пучка, то знание  $R_{min}$  позволяет найти значения тока и фазового объёма пучка:

$$v = (r/R_{min})^2, \quad J = \eta \cdot v \quad (4)$$

Кроме того, соответствующее  $R_{min}$  значение вектора  $A^* = \delta^*(0)$  задаёт для найденных по (4) величин  $J, v$  оптимальные условия входа в ускорительный канал: любое отклонение от них связано с увеличением поперечных размеров пучка в канале.

Отметим, что в частном случае длинного периодического канала при  $\eta = 0$  описанная процедура поиска приводит к нахождению в качестве решения  $\delta(s)$  вектора модулей функции Флоке этого канала.

Численные расчёты (см. [4]) подтвердили полученную в работе [2] общую зависимость:

$$I_{max} = I_{пред} \left[ 1 - (v/v_{пред})^2 \right] \quad (5)$$

где  $v_{пред}$  и  $J_{пред}$  равны соответственно наибольшему фазовому объёму и наибольшему току пучка, пропускаемого каналом с максимальной рабочей апертурой  $2r$ .



Знание пропускной характеристики трубки (5) и эмиссионной характеристики ионного источника позволяет выбрать рабочие значения тока  $I_p$  и фазового объема  $V_p$  ускоряемого пучка.

Для извлечения и начального формирования пучка удобно использовать системы электродов Пирса, профили и взаимное расположение которых необходимо определять с учетом величины  $V_p$ . Эта задача для слабосходящихся конических пучков рассмотрена в /5/, где приведены графики, позволяющие выбирать геометрию электродов в некоторых практических случаях. На основании данных, содержащихся в работах /2, 5, 6/ может быть оценено расфокусирующее действие экстракторного отверстия и рассчитан вектор  $\tilde{\gamma}^{(1)}$  огибающих ионного пучка в свободном от полей пространстве за экстрактором.

В общем случае значение  $\tilde{\gamma}^{(1)}$  не отвечает оптимальным условиям входа в ускорительный канал  $\tilde{\gamma}^{(2)}$ , необходимым для реализации рабочего режима. Для ионно-оптического согласования между ионным источником и ускорительной трубкой должна быть размещена специальная система, содержащая не менее четырех квадрупольных линз. Состояние этой системы можно описать заданием вектора  $D(d_1, \dots, d_n)$ , компонентами которого являются варьируемые параметры системы: градиенты линз, длины всех или части линз и свободных промежутков и т.д. В каждом своем состоянии  $D$  система преобразует вектор огибающих инжектируемого пучка  $\tilde{\gamma}^{(1)}$  в некий вектор  $\tilde{\gamma}^{(2)}$  близость которого к требуемому  $\tilde{\gamma}^2$  можно оценивать значением скалярной функции цели:

$$Q(D) = \sum_{j=1}^4 \alpha_j |\tilde{\gamma}_j^2 - \gamma_j^2| \quad (6)$$

где  $\alpha_j$  - весовые множители, позволяющие выравнять вклады отдельных компонент в величину  $Q$ .

Согласование выполнено, как только достигнуто  $Q \leq Q^* \approx 0$

Построение согласующей системы рассматривается как частный случай весьма общей задачи многопараметрической оптимизации: для определенной на множестве  $\{D\}$  функции цели  $Q(D)$

найти значение  $D^* \in \{D\}$ , обеспечивающее заданное  $Q(D^*) = Q^*$  /7/. Определение  $D^*$  ведется методом поиска, т.е. многократного решения прямых задач нахождения  $Q$  по  $D$ , а успех и быстрота решения определяются стратегией поиска.

В работе /8/ показано, что для ионно-оптического согласования интенсивных пучков частиц весьма перспективным оказывается метод статистического поиска /7/. Одним из основных его преимуществ по сравнению с детерминированными методами (градиента, скорейшего спуска и т.д.) является способность проходить локальные минимумы поверхности цели  $Q(D)$ , не "застревая" в них. При оптимизации прохождения пучком ускорительного канала ПРТ использовалась программа статистического поиска, описанная в /8/.

Реализация режимов ускорения интенсивных пучков может быть сильно затруднена из-за ухудшения электрической прочности трубки. В связи с этим, фокусирующая система должна не только формировать и транспортировать частицы основного пучка, но и эффективно удалять из области ускорения вторичные частицы (в первую очередь вторичные электроны), возникающие внутри трубки. При этом уменьшается "эффект полного напряжения", снижаются энергия и интенсивность фонового рентгеновского излучения, сокращается время тренировки трубки и повышается способность трубки сохранять электрическую прочность при ухудшении вакуума внутри нее /9/.

В работе /10/ для получения вторично-электронных характеристик некоторых типов фокусирующих систем был использован метод вычисления траекторий случайных частиц. Сравнение их показало, что системы, эквивалентные в отношении частиц основного пучка имеют резко различные вторично-электронные характеристики. В частности, для электростатического квадрупольного канала с градиентом поля  $G_E$  (В/м<sup>2</sup>), периодом ФОДО структуры  $L_0$  (м) и средней напряженностью ускоряющего поля  $E_0$  (В/м) пробеги вторичных электронов в основном не превышают длину  $L_0$ , если выполняется условие:

$$L_E = ch \frac{1}{2} (G_E L_0 / E_0)^{1/2} \gg 1 \quad (7)$$



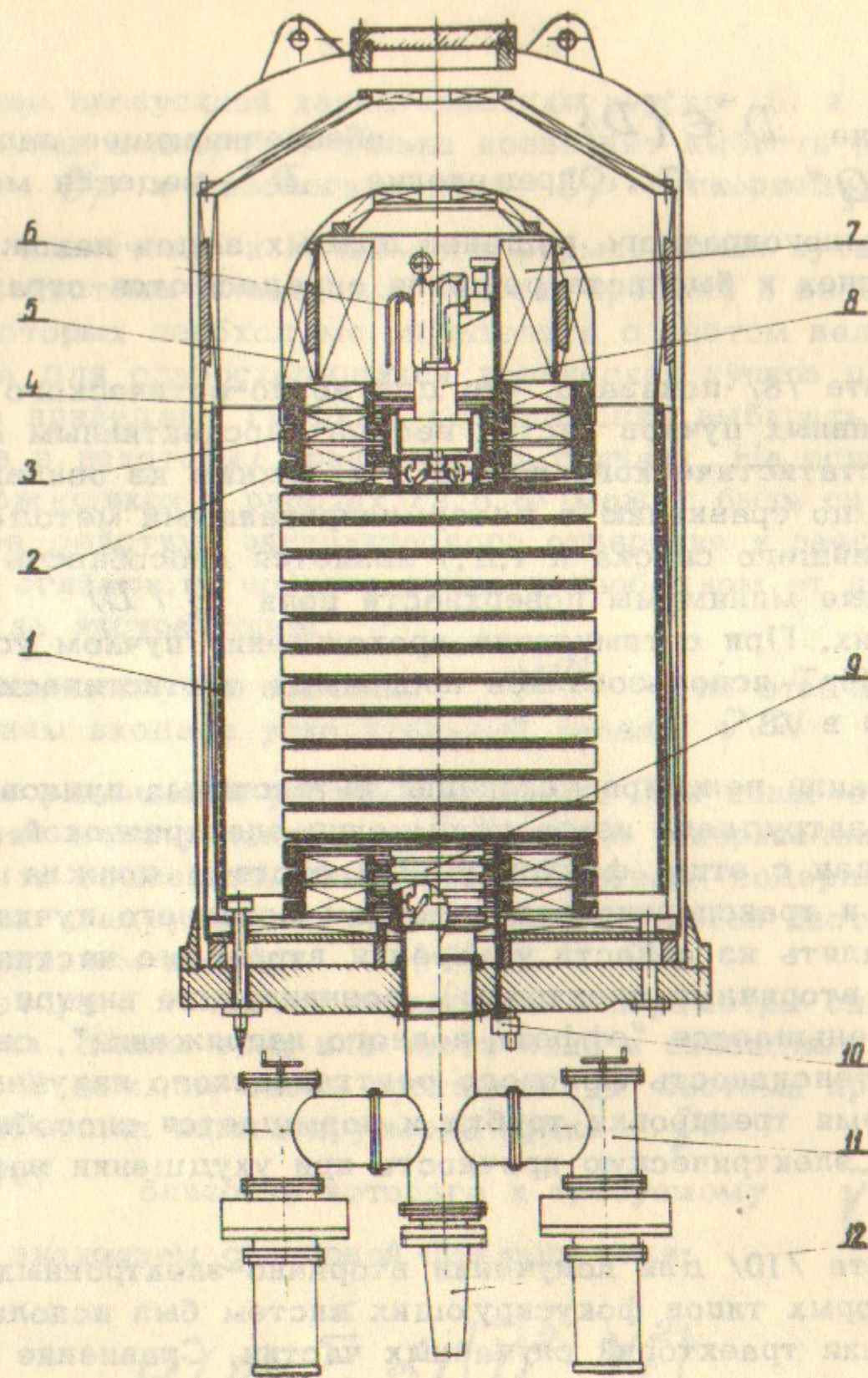


Рис.1. Общий вид экспериментального ускорителя протонов ПрТ.  
 1 - первичная обмотка, 2 - катушка вторичной обмотки,  
 3 - диск магнитопровода, 4 - наружный магнитопровод,  
 5 - высоковольтный электрод, 6 - маслопровод охлаждения ионного источника, 7 - системы управления и питания ионного источника, 8 - ионный источник, 9 - ускорительная трубка с электростатическими квадрупольными линзами,  
 10 - шток управления натекателем водорода, 11 - высоковакуумные паромасляные насосы, 12 - токоприёмный цилиндр.

Можно считать, что при  $dE \gg 1$  ускорительный канал обладает хорошими вторично-электронными качествами и обеспечивает высокую электрическую прочность трубки при прохождении по ней интенсивного пучка частиц. Если условие (7) нарушено (как это, например, имеет место для ускорителя ПрТ), то обеспечение электрической прочности трубки требует принятия дополнительных мер.

Для экспериментальной проверки приведенных выше соображений и сопоставления данных расчёта и опыта был построен ускоритель протонов ПрТ, принципиальная конструктивная схема которого дана на рис.1.

В качестве источника высокого напряжения использован трансформатор электронного ускорителя для промышленных целей ЭлТ-1,5, подробно описанный в работе [11]; первичная 1 и вторичная 2 обмотки расположены коаксиально; центральный магнитопровод состоит из отдельных изолированных друг от друга газовыми зазорами дисков 3 и оканчивается высоковольтным электродом ("головой") 5. Катушки вторичной обмотки соединены последовательно, они попарно закреплены на дисках и средняя точка каждой пары электрически соединена с диском. Ускорительная трубка 9 встроена в колонну трансформатора и для разнеса напряжения на ней соединена со всеми дисками пружинными контактами.

Эмиттером протонов является ионный источник 8 с магнитно-электрической осцилляцией электронов, работающий на водороде. При амплитуде ускоряющего напряжения 1,2 Мв напряжение экстракции ионов около 80 кв, ток ионов до 80 ма (импульсы длительностью  $2 + 5$  мсек, 50 гц) при содержании протонов более 50% и фазовой плотности пучка около 300 Ма/см.мрад. При неизменном напряжении экстракции величина ионного тока может регулироваться путем изменения потенциала специального управляющего электрода, расположенного в дуговой камере источника [2] с критической управляющей напряженностью около 2 Ма/в. Протонный инжектор в том виде, какой он имеет перед установкой в машину показан на рис.2. Он ставится на верхний торец ускорительной трубки через прокладку из силиконовой резины; от "земляной" маслопомпы при помощи изоляционных маслопроводов (поз.6 рис.1) источник охлаждается трансформаторным маслом.

Система отбора ионов, как указывалось выше, состоит из электродов Пирса, рассчитанных согласно работе [5]. Огибающие



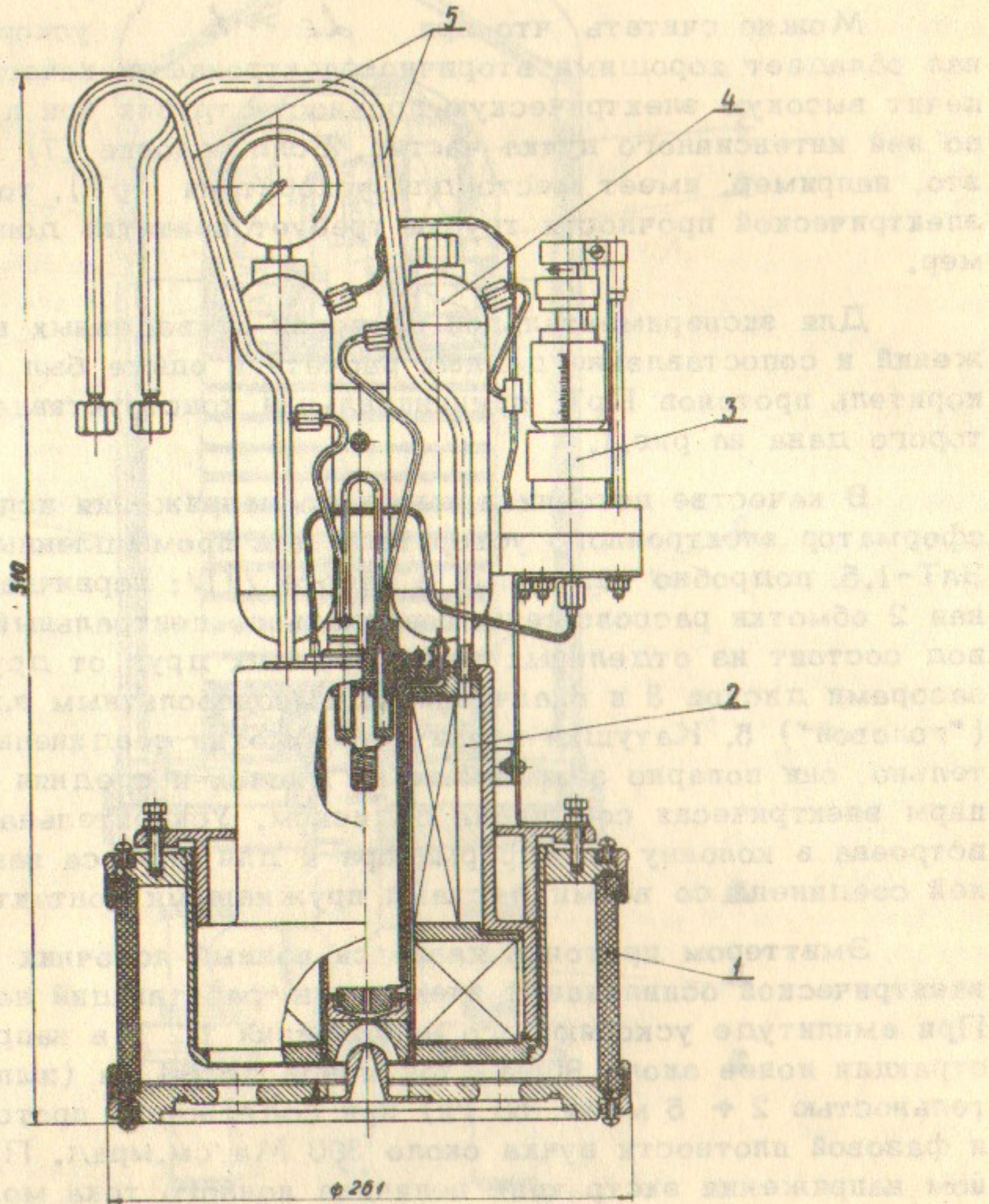


Рис.2. Узел источника в собранном виде:

1 - керамический изолятор, 2 - ионный источник, 3 - игольчатый натекатель, 4 - баллоны с водородом, 5 - маслопровод охлаждения.

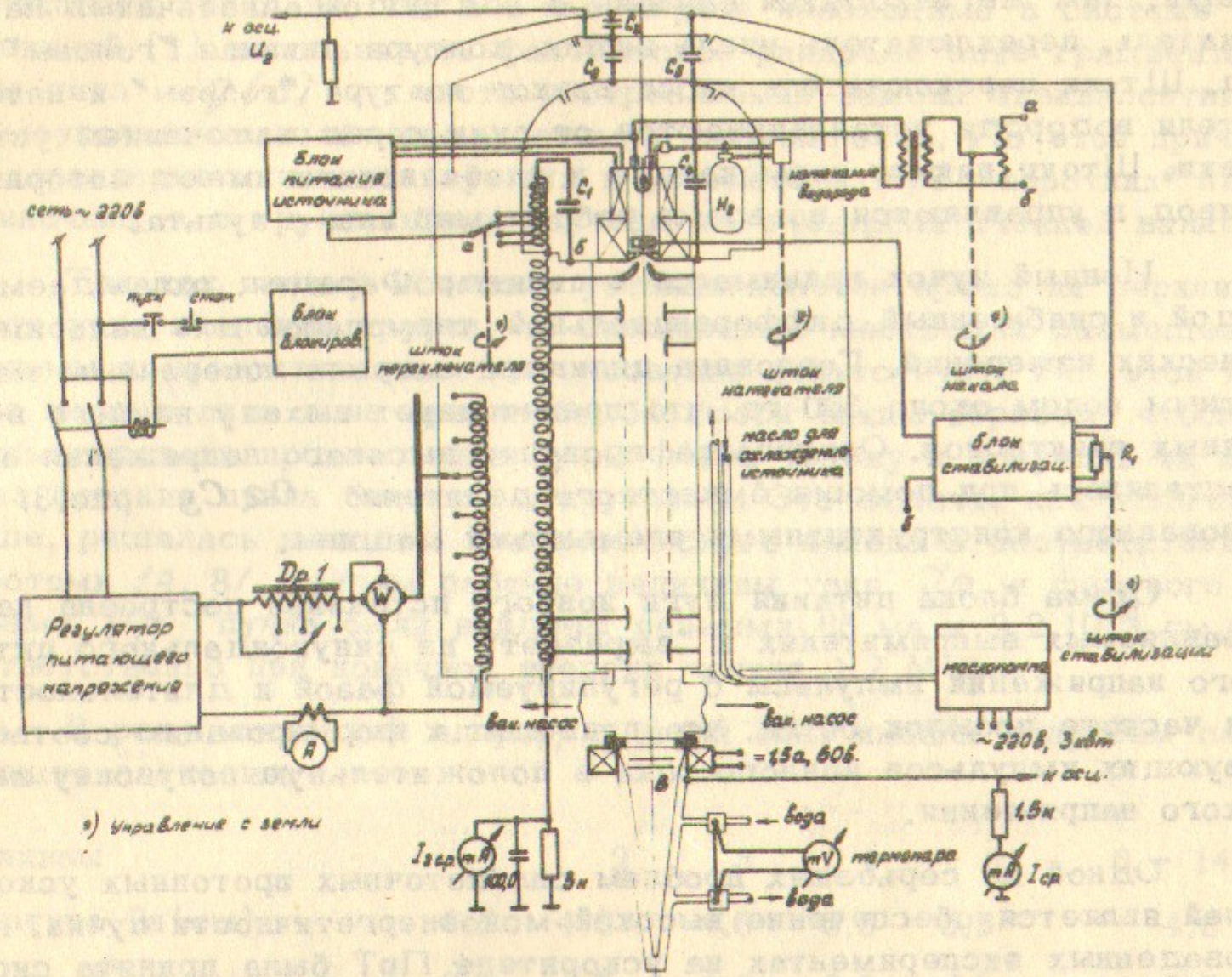


Рис.3. Схема питания и управления ускорителя ПрТ.

пучка после экстрактора измерялись на стенде и было обнаружено хорошее согласие с расчётом /6/.

Схема питания и управления установки ПрТ приведена на рис.3. В качестве регулятора питающего напряжения применен специальный трансформатор с регулировкой напряжения под нагрузкой в пределах от 0 до 1000 вольт при максимальной мощности 30 квт. В высоковольтном электроде (поэ.7 рис.1) размещены указанные



на схеме блоки питания ионного источника, стабилизации напряжения на ускорительной трубке, питание термокатода электронной пушки; там же находятся баллоны с водородом, игольчатый нагреватель, переключатель числа витков контура питания "головы" и т.д. Штоки переключателя числа витков контура "головы" и нагревателя водорода устанавливаются от руки перед включением установки. Штоки накала термокатода и стабилизации имеют моторный привод и управляются во время работы машины с пульта.

Ионный пучок принимался в цилиндр Фарадея, охлаждаемый водой и снабженный дифференциальной термопарой для калориметрических измерений. Горловина цилиндра закрыта поперечным магнитным полем около 300 гс, что препятствует выходу из него вторичных электронов. Осциллографирование высокого напряжения осуществлялось при помощи ёмкостного делителя  $C_2 C_3$  рис.3, образованного конструктивными элементами машины.

Схема блока питания дуги ионного источника построена на управляемых выпрямителях и "вырезает" из синусоидального питающего напряжения импульсы с регулируемой фазой и длительностью при частоте посылок 50 гц, что приводит к формированию соответствующих импульсов ионного тока в положительную полуволну высокого напряжения.

Одной из серьезных проблем сильноточных протонных ускорителей является обеспечение высокой моноэнергетичности пучка. В проведенных экспериментах на ускорителе ПрТ была принята система стабилизации, аналогичная описанной в работе /11/: обеспечение постоянства энергии достигается за счёт модуляции величины протонного тока во время импульса. Для этого снятая с ёмкостного делителя  $C_4 C_5$  рис.3 доля ускоряющего напряжения сравнивается с опорной величиной, вырабатываемой блоком стабилизации и при небалансе на управляющий электрод ионного источника подается потенциал, изменяющий величину ионного тока. В этом случае форма импульса тока полностью определяется динамическими характеристиками трансформатора и трубки. Если требования к уровню стабилизации невысоки, то возможна работа без системы стабилизации, при этом шток стабилизации используется для регулирования фазы токового импульса под нагрузкой.

Квадрупольный ускорительный канал состоит из четырнадцати электростатических линз с формулой расстановки ФОДО и периодом  $L_0 = 15,4$  см. Рабочая апертура последних девяти линз, по

данным предварительных расчётов, выбрана равной  $2a = 4,6$  см и длина  $l = 2,5$  см. Таким образом, канал оказывается составлен из "коротких" линз, для которых  $l/2a < 1$ . Специальные вычисления показали, что в этом случае необходимо в системе уравнений (1) использовать фактическое распределение градиента поля линз  $g(s)$ : часто употребляемая замена эквивалентным прямоугольником даёт недопустимую погрешность. По этой причине характеристики используемых в ускорителе ПрТ "коротких" линз, одиночных и в группе, были изучены на электролитической ванне.

Так как ионный источник устанавливается прямо на верхний торец ускорительной трубки, то специальное место для размещения системы ионно-оптического согласования отсутствует. По этой причине первые пять линз канала подбираются таким образом, чтобы оптимизировать прохождение пучка через трубку и получить на выходе сечение пучка близким к круглому. Эта задача, как отмечалось выше, решалась методом статистического поиска в соответствии с работами /4, 8/, причем рабочие величины тока  $I_p$  и фазового объёма  $V_p$  пучка были найдены равными 65 ма и  $2,2 \cdot 10^{-4}$  см.рад соответственно при конечной энергии частиц 1,2 Мэв.

В результате для апертур и длин линз канала получены следующие значения:

№ линзы	1	2	3	4	5	6 - 14
апертура $2a$ (см)	5,5	4,6	4,6	5,5	5,5	4,6
длина $l$ (см)	2,5	4,5	4,5	3,0	3,0	2,5

На рис.4 приведена схема расстановки линз и расчётные огибающие пучка в канале при энергии 1,2 Мэв, токе 65 ма и фазовом объёме  $2,2 \cdot 10^{-4}$  см.рад. Здесь же пунктиром дана огибающая аксиальносимметричного пучка в случае, если бы квадрупольная фокусировка была "отключена".

Конструкция ускорительной трубки показана на рис.5: в сплошной керамической трубке имеется система наружных и внутренних канавок, металлизированных серебром методом вжигания /12/. В этих канавках располагаются внутренние 3 и наружные 2 металлические кольца, электрический контакт между которыми выполнен с уплотнением из силиконовой резины. Разнос напряжения по трубке осуществляется резисторным делителем 8 и пружинными электрическими контактами 7, входящими в соприкосновение с дисками



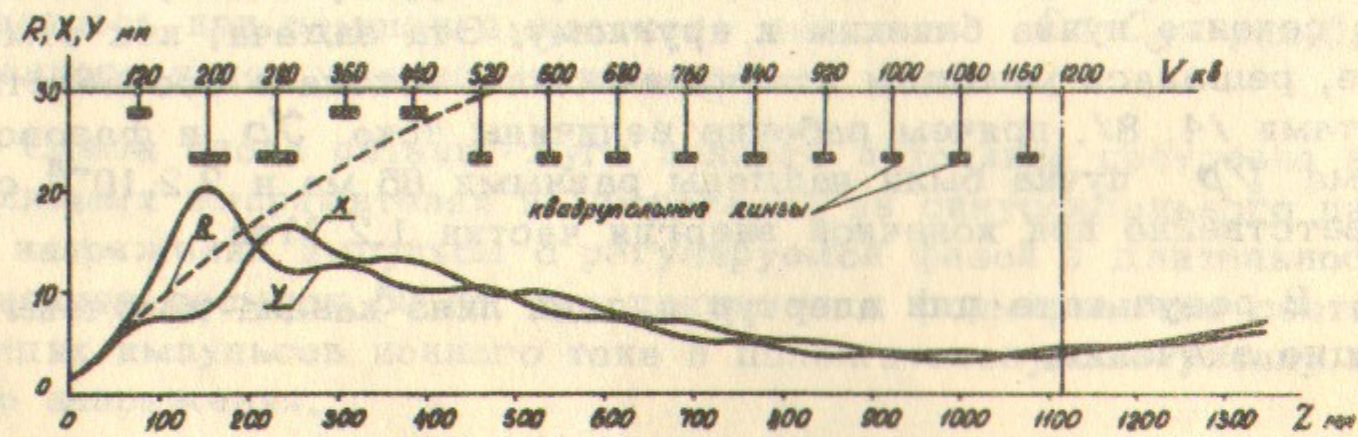


Рис.4. Огибающие пучка в ускорительном канале:

$X, Y$  - огибающие пучка в плоскостях  $XZ$  и  $YZ$  соответственно,

$R$  - огибающая пучка при "отключенной" квадрупольной фокусировке.

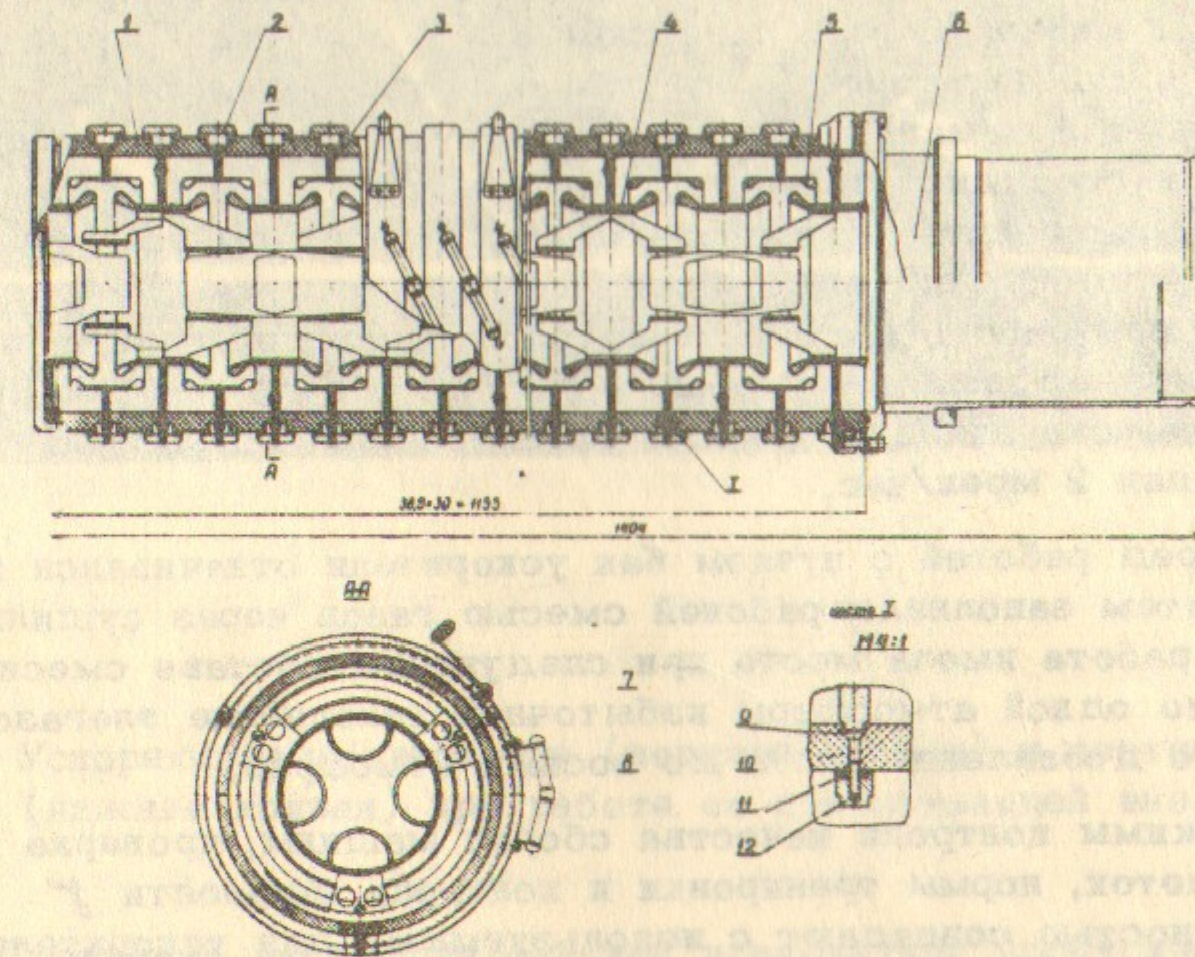


Рис.5. Ускорительная трубка:

1 - керамический изолятор, 2 - наружные металлические кольца, 3 - внутренние металлические кольца, 4 - корпус квадрупольной линзы, 5 - экран, 6 - горловина, 7 - электрический контакт, 8 - резисторный делитель напряжения, 9 - контактный лепесток из фольги, 10 - винт, 11 - шайба из силиконовой резины, 12 - фасонная гайка.



высоковольтной колонны (поз.3, рис.1) при установке трубки в машину. Корпуса и полюсные наконечники квадрупольных линз выполнены из немагнитной нержавеющей стали.

Для использованного в ускорителе ПрТ квадрупольного электростатического канала условие (7) не выполняется. По этой причине, а также учитывая общий высокий фон вторичных частиц из-за использования масляной системы откачки, в трубке создано поперечное оси канала знакопеременное постоянное магнитное поле с амплитудой около 20 гс и периодом  $\lambda_0 = 15,4$  см. С этой целью экраны 5 рис.5 изготовлены из углеродистой стали У12, закалены на мартенсит и намагничены по диаметру; при сборке трубки магнитные оси соседних экранов ориентируются во взаимно противоположных направлениях. Образованное таким образом поле практически не возмущает движения частиц основного пучка. Следует отметить, что при работе машины с трубкой описанной конструкции не наблюдались эффекты электронной нагрузки, а уровень радиации возле бака ускорителя на высоте расположения ионного источника не превышал 2 мрен/час.

Перед работой с пучком бак ускорителя откачивался на вакуум и затем заполнялся рабочей смесью газов через сушилку. Устойчивая работа имела место при следующем составе смеси: от вакуума до одной атмосферы избыточное наполнение элегазом  $SF_6$ , после чего добавление азота до восьми атмосфер.

Режимы контроля качества сборки машины, проверка добротности обмоток, нормы тренировки и контроль мощности  $\gamma$ -излучения полностью совпадают с используемыми для ускорителей электронов типа ЭлТ и описаны в /13/.

В процессе запуска и наладки ускоритель ПрТ работал в диапазоне энергий от 500 кэв до 1,2 Мэв без изменения в схемах питания и ускорения. На рис.6 приведена осциллограмма одного из типичных режимов работы со стабилизацией напряжения при разбросе энергий частиц меньше  $\pm 0,5\%$ ; максимальный ток 45 ма, средний ток 3,5 ма, энергия 1,2 Мэв. Та же стабильность энергии была получена на импульсах длительностью 2 мсек, 50 гц при максимальном токе пучка 80 ма (выше этой предельной величины тока наблюдалось резкое ухудшение вакуума и нагрев электродов трубки). В режимах с отключенным блоком стабилизации максимальные токи пучка превышали 60 ма (средние токи около 9 ма) на энергии 1,2 Мэв, а средние мощности в пучке составляли около 10 квт при разбросе энергий  $\pm 10\%$ .

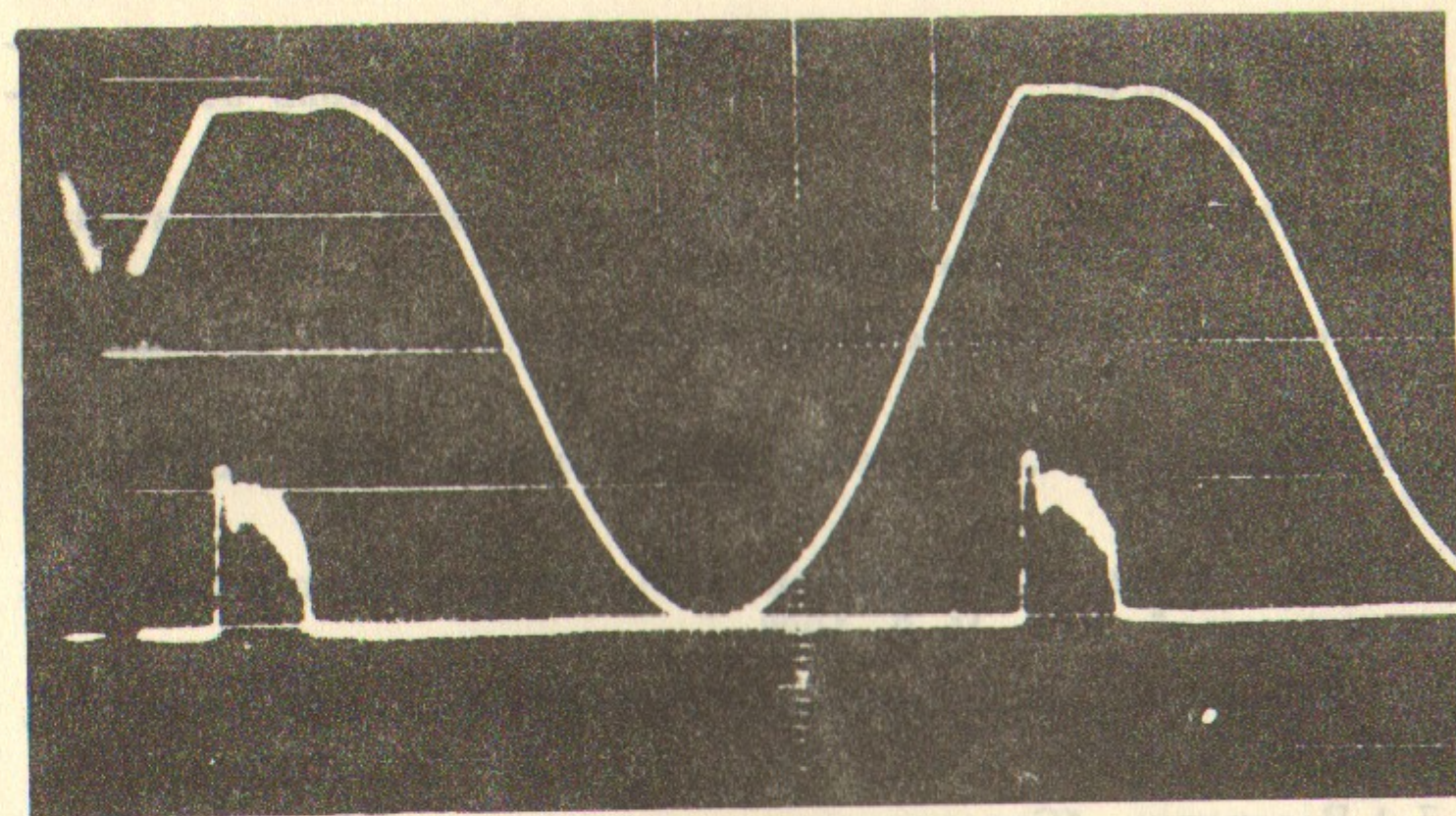


Рис.6. Ускоряющее напряжение (верхняя кривая) и протонный ток (нижняя кривая) при работе со стабилизацией энергии.

Сравнение экспериментальной и расчётной пропускной способности ускорительного канала и геометрии пучка на выходе из трубки (измерения проводились путем прожигания металлических сеток) указывает на удовлетворительное соответствие между ними, что оправдывает применение использованных при создании ускорителя расчётных методик и основных конструктивных решений.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке сильноточных инжекторов протонов и устройств ионной промышленной технологии.

Авторы глубоко благодарны П.Г.Харченкову, В.Е.Симонову, В.Л.Агапкину, А.И.Шушаро и А.Г.Елфимову за активное и творческое участие в создании и запуске ускорителя.



## Л и т е р а т у р а

1. Е.А.Абрамян, В.А.Гапонов. "Источник ускоренных частиц одинаковой энергии", авт. свид. № 208144, бюллетень изобретений № 3, 29.XI.67г.
2. И.М.Капчинский. "Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях", Москва, Атомиздат, 1968.
3. Е.А.Абрамян, В.В.Вечеславов. "Атомная энергия", 22, вып.5, 1967.
4. Е.А.Абрамян, В.В.Вечеславов, В.И.Кононов, ЖТФ, XXУШ, № 10, 1968.
5. В.В.Вечеславов, В.А.Горбунов, В.И.Кононов. "Радиотехника и электроника", XIII, № 8, 1968.
6. В.В.Вечеславов, В.А.Горбунов. "Радиотехника и электроника", XIУ, № 7, 1969.
7. Л.А.Растрин. "Статистические методы поиска", Москва, изд. "Наука", 1968.
8. В.В.Вечеславов, В.И.Кононов, ЖТФ, XXXIX, № 7, 1969.
9. J.W. Pussec et al. *Phys. Rev.* 121, n4, 1964г.
10. В.В.Вечеславов, В.И.Кононов. "Атомная энергия", 25, вып. 2, 1968.
11. Е.А.Абрамян, В.А.Гапонов. "Атомная энергия", 20, вып.5, 1966.
12. Е.А.Абрамян, В.А.Гапонов. "Атомная энергия", 22, вып.1, 1967.
13. В.А.Гапонов. Диссертация, ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1967.



Литература

1. В.А.Абрамук, В.А.Галосин, "Атомная энергия", 20, стр. 10, 1967.
2. В.А.Абрамук, "Древняя энергия в древности", Ленинград, 1967.
3. В.А.Абрамук, В.А.Галосин, "Атомная энергия", 20, стр. 10, 1967.
4. В.А.Абрамук, В.А.Галосин, "Атомная энергия", 20, стр. 10, 1967.
5. В.А.Абрамук, В.А.Галосин, "Атомная энергия", 20, стр. 10, 1967.
6. В.А.Абрамук, В.А.Галосин, "Атомная энергия", 20, стр. 10, 1967.
7. В.А.Абрамук, "Статистические методы подсчета", Москва, 1967.
8. В.А.Абрамук, В.А.Галосин, "Атомная энергия", 20, стр. 10, 1967.
9. J. H. Plesch et al. *Phys. Rev.* 121, 46, 1964.
10. В.А.Абрамук, В.А.Галосин, "Атомная энергия", 20, стр. 10, 1967.
11. В.А.Абрамук, В.А.Галосин, "Атомная энергия", 20, стр. 10, 1967.
12. В.А.Абрамук, В.А.Галосин, "Атомная энергия", 20, стр. 10, 1967.
13. В.А.Абрамук, Ленинград, ИЯФ СО АН СССР, Ленинград, 1967.

---

Ответственный за выпуск М.М.Бровин  
Подписано к печати 25.УП-1969г.  
Усл. 0,9 печ.л., тираж 250 экз. Бесплатно.  
Заказ № 319

---

Отпечатано на ротационной машине в ИЯФ СО АН СССР, лв.