

Сильноточный линейный ускоритель протонов с непрерывным режимом работы

Б. К. ШЕМБЕЛЬ, Е. Г. КОМАР, А. П. ФЕДОТОВ, Н. В. ПЛЕШИВЦЕВ, В. А. ТЕПЛЯКОВ,
Е. А. СИДОРОВ, Д. В. КАРЕТНИКОВ, О. С. ЛУПАНДИН, И. И. ФИНКЕЛЬШТЕЙН, Г. А. КОВАЛЬСКИЙ,
А. С. ТЕМКИН, Е. С. НЕЛИПОВИЧ, В. В. ОСИПОВ, В. А. ЗЕНИН, И. И. СУЛЫГИН

УДК 621.384.6.44

В ускорительной технике большое внимание уделяется увеличению интенсивности линейных ускорителей — инжекторов протонных синхротронов — и разработкам ускорителей на большой средний ток при работе в непрерывном режиме или в режиме с малой скважностью [1—4].

В данной статье приводятся некоторые результаты, полученные при наладке макета сильноточного линейного ускорителя протонов с непрерывным режимом работы, имеющего следующие параметры: выходная энергия $W_k = 500 - 550$ кэВ, энергия инжекции $W_0 = 85 - 100$ кэВ, ток ускоренных протонов $I_p = 250$ мА, рабочая длина волны $\lambda = 12,5$ м. В ускорителе используется фокусировка продольным магнитным полем.

Некоторые экспериментальные и расчетные результаты, полученные при запуске ускорителя, опубликованы в работах [5—8].

Описание ускорителя

Ускоряющая система описываемой машины подобна системе, использовавшейся в начальной части ускорителя А-48 [2]. Она состоит из трех четвертьволновых коаксиальных резонаторов, первый из которых играет роль группи-

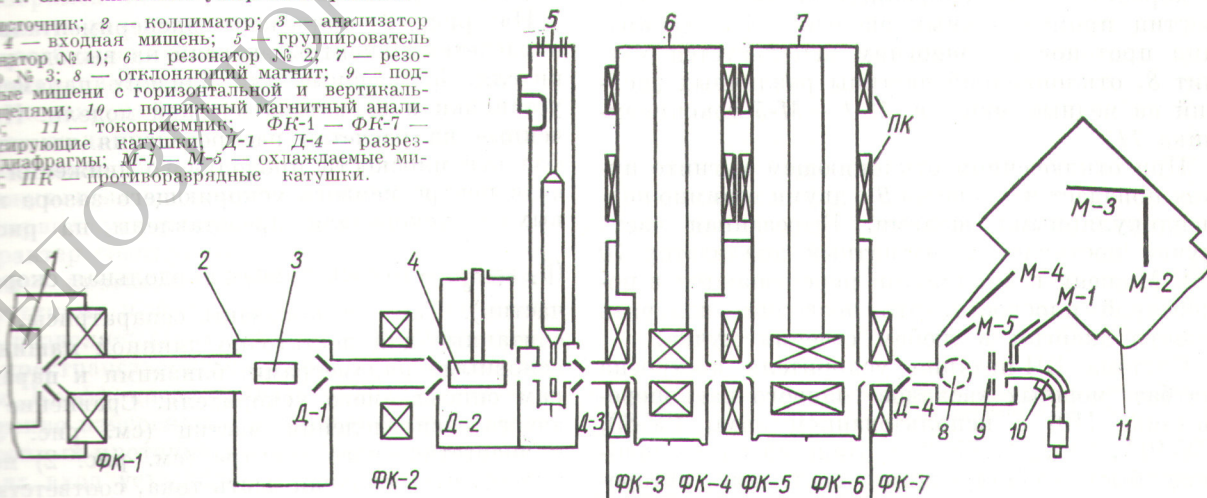
рователя (рис. 1). Для обеспечения устойчивого возбуждения резонаторов в непрерывном режиме при наличии отсева частиц средняя напряженность поля в зазорах принята равной 20—25 кВ/см, что составляет примерно половину величины, рассчитанной по формуле Килпатрика.

Основные параметры ускоряющей системы приведены в таблице.

Перед инжекцией в ускоряющую систему необходимо из пучка ионов водорода, выходящего из ионного источника, отделить молекулярные ионы H_2^+ и H_3^+ , содержание которых составляет 20% от общего тока пучка. С этой целью при помощи подвижного магнитного анализатора масс ионов водорода [9] определялись следующие параметры пучков H_1^+ , H_2^+ и H_3^+ : диаметр, наклон траекторий к оптической оси, распределение плотности тока по сечению и фазовый объем каждой из компонент. В кроссоверах протонного пучка помещались диафрагмы Д-1 и Д-2, на которые направлялись молекулярные ионы при помощи фокусирующих катушек ФК-1 и ФК-2 (см. рис. 1). При такой сепарации молекулярные ионы составляют менее 1% от тока протонов и в то же время не возникает дополнительных aberrаций протонного пучка.

Рис. 1. Схема линейного ускорителя протонов:

1 — источник; 2 — коллиматор; 3 — анализатор масс; 4 — входная мишень; 5 — группирователь резонатор № 1; 6 — резонатор № 2; 7 — резонатор № 3; 8 — отклоняющий магнит; 9 — подвижные мишени с горизонтальной и вертикальной целями; 10 — подвижный магнитный анализатор; 11 — токоприемник; ФК-1 — ФК-7 — фокусирующие катушки; Д-1 — Д-4 — разрезные диафрагмы; М-1 — М-5 — охлаждаемые мишени; ПК — противорадиационные катушки.



Основные параметры ускоряющей системы

Параметр	Номер резонатора		
	1 (группирователь)	2	3
Выходная энергия протонов, <i>кэв</i>	95	250	500
Амплитуда напряжения на зазоре, <i>кв</i>	60	200	210
Амплитуда напряженности электрического поля в зазоре, <i>кв/см</i>	10	25	21
Кратность дрейфа, <i>βλ</i>	0,5	1,5	1,5
Длина трубки дрейфа, <i>см</i>	1,0	24,5	42,1
Длина зазора, <i>см</i>	6,0	8,0	10,0
Диаметр апертуры, <i>см</i>	8,0	9,4	10,0
Добротность	2400	10000	11000
Шунтовое сопротивление, <i>ком</i>	87	535	535
Мощность ВЧ-потерь в стенках резонатора, <i>квт</i>	20,7	37,4	41
Полная мощность, вводимая в резонатор (при токе ускоренных протонов 250 <i>ма</i>) <i>квт</i>	20,7	76,2	103,5
К. п. д. резонатора (при токе ускоренных протонов 250 <i>ма</i>), %		51	60
Частота ускоряющего поля, <i>Мгц</i>	24	24	24

Качество юстировки пучка контролировалось при помощи четырех секционированных диафрагм, размещенных вдоль ускорителя.

На выходе ускорителя пучок состоит из ускоренных и неускоренных частиц, а также частиц промежуточных энергий. Для сепарации протонов по энергиям используется магнит 8, отклоняющий частицы различных энергий на медные мишени *М-1—М-5* токоприемника 11.

При отключенном отклоняющем магните пучок попадает на мишени 9 с двумя взаимно перпендикулярными щелями. Вырезанная часть пучка поступает в магнитный анализатор 10 [8]. Мишени и анализатор перемещаются в поперечной плоскости, что позволяет измерять спектр энергии в любом сечении пучка.

Система ВЧ-питания ускорителя построена на базе мощных каскадов типового радиопередатчика [10] с использованием ламп ГУ-80, ГУ-10А, ГУ-22А, ГУ-23А. Каждый канал снабжен быстродействующими системами авторегулирования фазы и амплитуды ускоряющего

поля и медленной системой автоподстройки резонаторов.

ВЧ-мощность подводится к резонаторам по жестким коаксиальным фидерам, длина которых кратна $\lambda/2$. Для борьбы с вторичноэлектронным резонансным разрядом в группирователе используется постоянное смещение (-700 в), а в ускоряющих резонаторах — постоянное магнитное поле, создаваемое противоразрядными катушками ПР.

Вакуум в резонаторах ($2 \cdot 10^{-6}$ *торр*), инжекторе (10^{-5} *торр*) и токоприемнике ($5 \cdot 10^{-6}$ *торр*) обеспечивается девятью паровутными агрегатами РВА-6-1.

Экспериментальные и расчетные результаты исследования динамики пучка

В описываемом сильноточном ускорителе с низкой энергией инжекции кулоновское взаимодействие частиц накладывает наиболее жесткие ограничения на продольное движение. Поэтому основное внимание при исследовании динамики пучка уделялось определению величины коэффициента захвата.

Для короткой машины, на длине которой процесс формирования сгустка полностью не завершен, коэффициент захвата является некоторой условной величиной. Он определяется долей тока, попадающего в сепаратрису предполагаемой дальнейшей части ускорителя.

Помимо экспериментов в ходе исследования проводились расчеты на электронной цифровой вычислительной машине (ЭЦВМ) М-20 с помощью специальной программы, которая позволяет математически моделировать динамику интенсивного «нагретого» пучка в канале ускорителя [11].

На рис. 2 приведены экспериментальный и расчетный спектры энергий на выходе ускорителя, полученные для близких параметров установки и ее математической модели. Полученные из расчетов распределения частиц на фазовой плоскости продольного движения (β_z , φ) в центре первого ускоряющего зазора и на выходе ускорителя представлены на рис. 3

($\beta_z = \frac{z}{c}$ — относительная продольная скорость частиц). Там же показаны сепаратрисы, рассчитанные для достаточно длинной машины с основными параметрами, близкими к параметрам описываемого ускорителя. Сравнение фазового распределения частиц (см. рис. 3, б) и энергетического спектра (см. рис. 2) показывает, что основная часть тока, соответствующая пику ускоренных частиц, занимает срав-

Дополн.

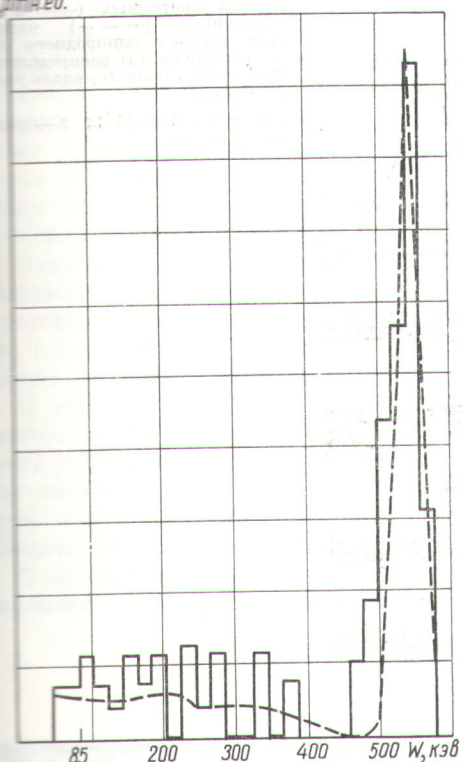


Рис. 2. Экспериментальный (---) и расчетный (—) спектры энергий на выходе ускорителя (режим ускорения: $W_0 = 85$ кэВ, $U_y = 200$ кВ, разность фаз между напряжениями в резонаторах $\Delta\phi = 46^\circ$, группирователь отключен).

нительно небольшой фазовый угол и может быть захвачена дальнейшей частью ускорителя.

Экспериментальная методика измерения коэффициента захвата заключалась в следующем: после возбуждения резонаторов магнитный канал настраивался на оптимальное прохождение ускоренных частиц. В условиях неравномерного по длине машины фокусирующего магнитного поля большинство частиц низких и промежуточных энергий высаживается на стенках первых ускоряющих зазоров.

Характер спектра протонов на выходе ускорителя — провал в спектре между ускоренными частицами и частицами с низкими энергиями — позволяет с помощью отклоняющего магнита пространственно выделить ускоренные частицы. Коэффициент захвата определяется как отношение измеренного калориметрически тока ускоренных протонов к току частиц, поступающих на вход ускорителя. В качестве примера можно привести данные для типичного режима

ускорения: $W_0 = 95$ кэВ, $W_k = 500$ кэВ, амплитуды ускоряющих напряжений $U_y = 200$ кВ, ток на входе ускорителя $I_0 = 520$ мА, $I_y = 135$ мА, коэффициент захвата $\kappa = \frac{I_y}{I_0} = 26\%$.

На первых зазорах ускорителя относительное приращение энергии частиц составляет 100—150%, т. е. процесс ускорения является сугубо неадиабатическим. В этих условиях наблюдается существенное расширение области захвата вследствие неконсервативности продольного движения [12], качественно показанное на рис. 3, а. В данном случае захват увеличивается вдвое за счет частиц, лежащих на входе машины за пределами сепаратрисы.

Допустимый относительный разброс частиц по импульсам на входе ускорителя составляет $\pm 35\%$. Это обстоятельство позволяет использовать в группирователе относительно большую

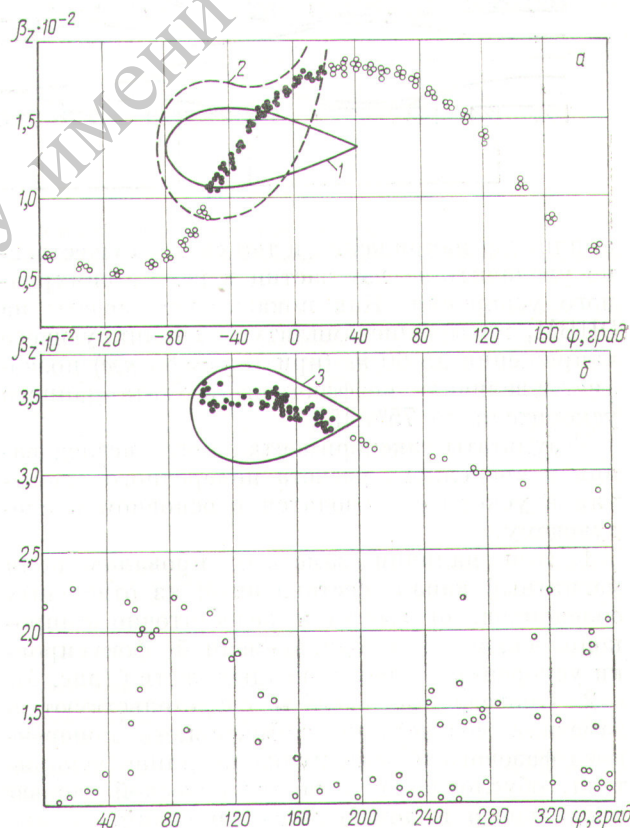
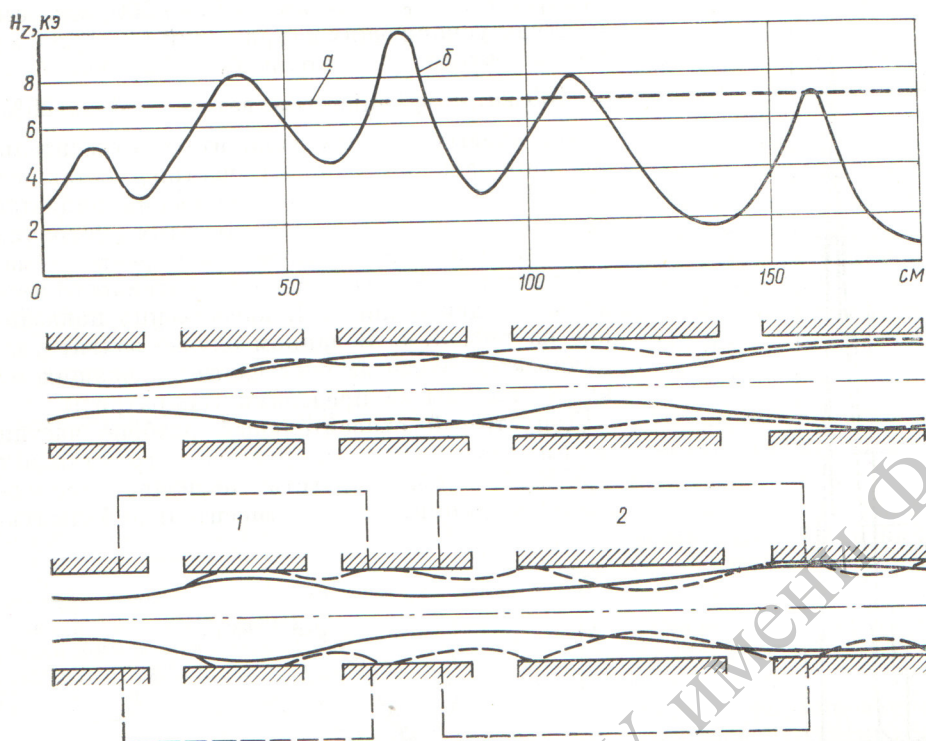


Рис. 3. Распределения частиц на фазовой плоскости продольного движения в центре первого ускоряющего зазора (а) и на выходе ускорителя (б):

1 — сепаратриса на входе ускорителя; 2 — качественные границы области захвата при учете неконсервативности продольного движения; 3 — сепаратриса на выходе ускорителя; ● — захваченные частицы.



Р и с. 4. Расчетные огибающие пучков ускоренных (—) и неускоренных (---) частиц для случаев однородного (а) и реального (б) распределений магнитного поля H_z вдоль ускорителя:

1 — резонатор № 2; 2 — резонатор № 3.

амплитуду напряжения и тем самым существенно увеличить захват частиц в режим синхронного ускорения. Как показывают расчеты на ЭЦВМ, повышение амплитуды группирующего напряжения до 60 кВ (при $W_0 = 85$ кэВ) позволяет увеличить коэффициент захвата данного ускорителя до 75% [5].

Результаты экспериментального исследования и численного расчета поперечного движения в ускорителе сводятся в основном к следующему.

1. При наличии заметных провалов поля магнитный канал, составленный из отдельных соленоидов, оказывается недостаточно «широкополосным» для одновременной фокусировки ускоренных и неускоренных частиц (рис. 4).

2. Проведенные расчеты свидетельствуют о заметном возрастании эффективного поперечного фазового объема пучка по длине ускорителя, обусловленного параметрической связью продольного и поперечного движений.

Технологические особенности мощного ускорителя

Полученная на описываемой установке интенсивность протонного пучка сравнима с ин-

тенсивностью в импульсе современных линейных ускорителей. Однако средний ток в данной машине на четыре-пять порядков выше, что обуславливает определенные технологические особенности ее работы.

При большой средней мощности пучка сколько-нибудь заметный отсев частиц внутри ускоряющей системы недопустим, так как он приводит к значительным тепловым нагрузкам на элементах канала, сильному газовыделению и рождению электронов. В результате снижается электрическая прочность ускоряющих зазоров, возрастают требования к вакуумной системе, возникают серьезные проблемы теплоотвода, усложняются вопросы радиационной безопасности. Поэтому все элементы, образующие канал пучка, изготовлены из меди и интенсивно охлаждаются водой. Как показал опыт, применение для этой цели нержавеющей стали недопустимо из-за плохой теплопроводности.

Для приема пучка используются охлаждаемые водой мишени с большим удельным теплосъемом (не менее 1 кВт/см²) [8].

Паразитная нагрузка резонаторов не захваченными в режим ускорения протонами и вторичными частицами требует определенного запаса мощности ВЧ-генераторов, затрудняет ус-

тойчивое возбуждение резонаторов и нередко приводит к пробоям.

На поверхностях, куда попадает пучок, а также электронный поток, разбрасываемый ВЧ-полем резонаторов, наблюдались эрозия мягкого припоя и изъязвления меди. В местах возникновения вторичноэлектронного резонансного разряда эрозия металлов приводит к интенсивному напылению на изоляторы.

Замена паромасляных насосов ртутными облегчила прохождение области вторичноэлектронного резонансного разряда. Уменьшилось до 1,5–2 ч время ВЧ-тренировки резонаторов после их вскрытия.

В заключение следует подчеркнуть, что указанные выше специфические особенности мощного ускорителя с непрерывным режимом работы особенно остро ставят вопрос о максимальном повышении коэффициента захвата с помощью предварительной группировки частиц.

Пользуемся случаем поблагодарить всех товарищей, которые участвовали в этой работе.

Поступила в Редакцию 25/V 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. N. Semenov et al. CERN Symposium on High Energy Accelerators and Pion Physics. Vol. 1. Geneva, CERN, 1956, p. 207.
2. Э. Лоуренс. Материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1955). Т. 16, М., Изд-во АН СССР, 1958, стр. 73.
3. AECL 2600, Canada, Chalk-River, 1966.
4. L. Rosen. Phys. Today, 19, 21 (1966).
5. В. А. Енальский и др. ЖТФ, XXXIX, 2034 (1969).
6. Р. А. Демирханов и др. «Приборы и техника эксперимента», № 2, 19 (1964).
7. Н. В. Плешивцев и др. «Атомная энергия», 22, 128 (1967).
8. Ю. Г. Гендель, В. А. Зенин. «Приборы и техника эксперимента», № 5, 224 (1968).
9. Н. В. Плешивцев, Б. М. Безверхов, О. Г. Матвеев. Бюллетень изобретений № 25, 1968.
10. И. И. Ильина. В сб. «Коротковолновые радиовещательные передающие устройства». М., Связьиздат, 1958, стр. 105.
11. В. А. Енальский, В. В. Осипов. «Прикл. мех. и техн. физ.», № 5, 29 (1967).
12. Ю. С. Саясов, В. К. Мельников. ЖТФ, XXX, 656 (1960).

РЕФЕРАТЫ

СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В НАСТОЯЩЕМ ВЫПУСКЕ

УДК 621.039.562.24

О стабилизации поля тепловыделения в быстром реакторе при помощи органов управления. Г. Б. Усачев, В. А. Шибанов, В. А. Чирков. «Атомная энергия», 31, 8 (1971).

Рассмотрено влияние расположения в активной зоне быстрого реактора системы поглощающих стержней на воспроизводство ядерного горючего и температуру оболочки твэлов.

Показано, что если внутренний коэффициент воспроизводства меньше единицы, целесообразно размещать стержни ближе к периферии активной зоны. Представлены результаты расчетов для реактора мощностью 1000 Мвт (эл.). (3 рис., 1 табл., 3 библиографических ссылки.)

The effect of the neutron-absorbing control rods disposition in fast reactor core on the nuclear fuel breeding and the fuel cladding temperature is analysed. It is shown, that, if the inner breeding ratio is smaller than unit, it is expedient to locate the rods in the outlying district of the core. The results of calculation for 1000 Mw (e) reactor are given (3 figures, 1 table, 3 references.)

УДК 621.039.556

Измерение радиационного тепловыделения в конструкционных и замедляющих материалах на реакторе ИВВ-2. В. П. Герасименко, В. Н. Голицкий, В. В. Гусев, Л. В. Константинов, П. М. Коротовских, С. В. Сидоров, В. Г. Чудинов. «Атомная энергия», 31, 10 (1971).

С помощью квазиadiaбатического и изотермического калориметров измерены величины радиационного тепловыделения в конструкционных и замедляющих материалах в отходящей и активной зоне реактора ИВВ-2. Результаты, полученные обоими методами, в пределах 10–15% совпадают друг с другом и близки к расчетной оценке тепловыделения в отражателе, основанной на простых предположениях о спектре γ -квантов и быстрых нейтронов. Показано, что свинцовый экран толщиной 20 мм практически полностью исключает γ -компоненту тепловыделения в водородсодержащем замедлителе, а в алюминии снижает ее примерно в 2,5 раза. (3 рис., 1 табл., 7 библиографических ссылок.)

With the quasy-adiabatic and isothermic calorimeters the values of radiation heat release have been measured in some structural and moderating materials of the reflector and the core of the water cooled and moderated reactor IWW-2. The results, obtained by both methods, coincide within limits of 10–15% and are close to the results of calculations, based on simple assumptions about the γ - and fast neutron spectra. It is shown, that a lead screen 20 mm thick almost completely eliminates the γ -component of radiation heat release in hydrogenous moderators and reduces it in aluminium approximately 2,5 times. (3 figures, 1 table, 7 references.)

УДК 621.384.644

Сильноточный линейный ускоритель протонов с непрерывным режимом работы. Б. К. Шембель, Е. Г. Комар, А. П. Федотов, Н. В. Плешивцев, В. А. Тепляков, Е. А. Сидоров, Д. В. Каретников, О. С. Лупандин, И. И. Финкльштейн, Г. А. Ковальский, А. С. Темкин, Е. С. Нелипович, В. В. Осипов, В. А. Зенин, И. И. Сулыгин. «Атомная энергия», 31, 45 (1971).

В статье приводятся некоторые результаты, полученные при наладке сильноточного линейного ускорителя, работающего в непрерывном режиме.

Основные параметры ускорителя: энергия инжекции 85–100 кэВ, выходная энергия 500–600 кэВ, ток ускоренных протонов 250 мА, рабочая частота 24 МГц.

Исследованы характеристики продольного движения и описаны технологические особенности мощного ускорителя. (4 рис., 1 табл., 12 библиографических ссылок.)

The paper presents some results obtained when starting a high-current CW-mode linear proton accelerator. Main parameters of the linac are as follows: injection energy between 85 and 100 KeV, output energy between 500 and 600 KeV, accelerated proton current 250 mA, operating frequency 24 Mc. Characteristics of longitudinal motion have been studied and some features of this high-power accelerator are described. (4 figures, 1 table, 12 references.) (продолжение см. на стр. 53)