

УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

*Н.И. Айзацкий, А.Н. Довбня, В.Ф. Жигло, Е.Ю. Крамаренко, В.А. Кушнир,
В.В. Митроченко, С.А. Пережогин, А.Н. Опанасенко*
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина
E-mail: mitvic@kipt.kharkov.ua

Приведены результаты разработки ускоряющей системы 10 см-диапазона, состоящей из 80 кВ диодной пушки, предгруппирователя клистронного типа и круглого диафрагмированного волновода (КДВ) с видом колебаний $2\pi/3$. Начальная часть КДВ представляет собой волноводный группирователь с переменной фазовой скоростью. Для обеспечения малых потерь пучка система помещена во внешнем магнитном поле. В качестве источника сверхвысокочастотной мощности (СВЧ) планируется применение промышленного клистрона с импульсной мощностью до 5 МВт и средней мощностью до 36 кВт. Согласно расчетам, ток пучка на выходе системы составляет около 90 % тока пушки. При выходном токе пучка 0,39 А энергия частиц составляет 9,4 МэВ.

ВВЕДЕНИЕ

Ускоритель электронов ЛУ-10 [1] используется в ННЦ ХФТИ для проведения исследований в области взаимодействия электронного пучка и тормозного излучения с веществом, а также для облучения различной продукции с 1987 года. Планируется провести модернизацию ускорителя, в частности, для увеличения средней мощности пучка до 20 кВт. Вместе с оснащением ускорителя устройством для разводки пучка на различные мишени, это позволит расширить исследовательские программы наряду с увеличением производительности процесса облучения.

При разработке ускоряющей системы для модернизации ускорителя мы исходили из нескольких основных предпосылок. Диапазон частот и тип ускоряющей секции были выбраны исходя из наличной технологической базы в ННЦ ХФТИ. В качестве источника СВЧ-мощности мы ориентировались на использование промышленных клистронов 10 см-диапазона с выходной импульсной мощностью 5 МВт и средней мощностью до 36 кВт. Такие клистроны выпускаются рядом зарубежных фирм.

Выбор конфигурации ускорителя основывался на численном моделировании с применением таких программ как SUPERFISH/POISSON [2], PARMELA [3], методики [4], рекомендаций, изложенных в [5]. Кроме того, были использованы уравнение диффузии мощности [6] и теория связанных резонаторов [7].

Ниже приведено описание разработанной ускоряющей системы, ее характеристики и результаты моделирования динамики частиц.

1. УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Ускоряющие секции для линейных ускорителей электронов, которые были произведены до настоящего времени в ННЦ ХФТИ, представляли собой, в основном, отрезки КДВ, выполненных по технологии диск-кольцо. Поэтому для модернизации ЛУ-10 мы также выбрали такой тип секции. Для уменьшения регулируемых параметров ускорителя начальная часть секции представляет собой волноводный группирователь, рассчитанный на начальную энер-

гию пучка 80 кэВ. Исходя из проведенного моделирования, были выбраны начальная фазовая скорость и амплитуда волны, законы их плавного изменения, количество ячеек.

Основная часть секции выбиралась с использованием решения уравнения диффузии мощности исходя из основных критериев – прирост энергии 10 МэВ, электронный коэффициент полезного действия (КПД) > 85% и малая СВЧ-мощность, рассеиваемая в ячейке секции. При эксплуатации ускорителя с большой средней мощностью последние две величины важны. Характеристики секции, включая группирователь, приведены на Рис.1-3 и в Табл.1.

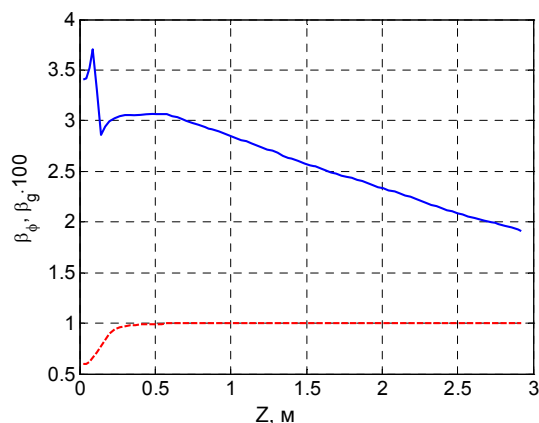


Рис.1. Изменение групповой (сплошная кривая) и фазовой (пунктирная кривая) скоростей волны вдоль секции

Таблица 1

| | |
|-------------------------------------|-------|
| Количество ячеек банчера | 18 |
| Общее количество ячеек | 86 |
| Максимальный радиус диафрагм, мм | 16 |
| Минимальный радиус диафрагм, мм | 12 |
| Общая длина, м | 3 |
| Время заполнения, нс | 386 |
| Затухание, Непер | 0,247 |
| Начальная относит. фазовая скорость | 0,6 |
| Набор энергии (4,6 МВт, 0,4 А), МэВ | 10 |
| Электронный КПД (4,6 МВт, 0,4 А), % | 87 |

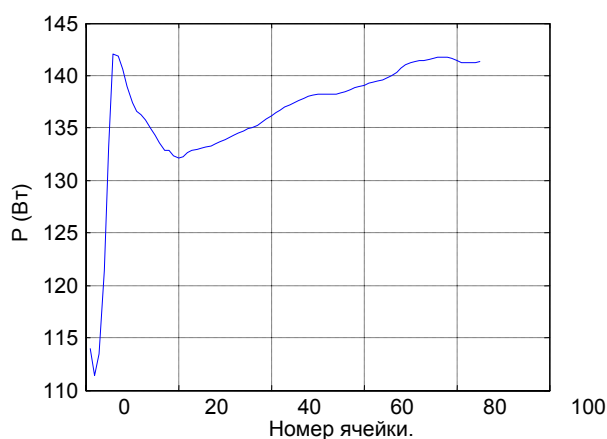


Рис.2. Мощность СВЧ-потерь на ячейку секции при СВЧ-мощности 4,6 МВт, длительности импульса 10 мкс и частоте повторения 600 Гц

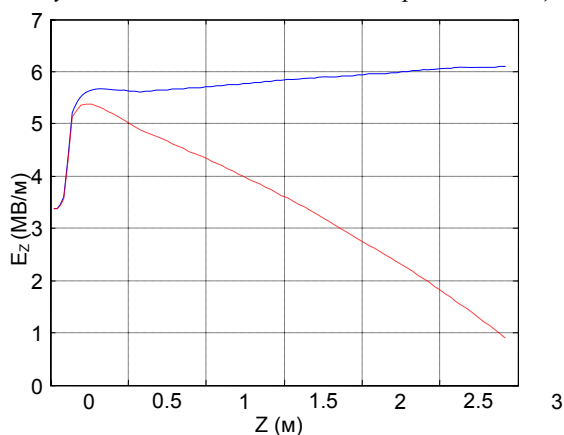


Рис.3. Распределение ускоряющего поля вдоль секции при СВЧ-мощности 4,6 МВт и токе, равном нулю (сплошная кривая), и токе равном 0,4 А (пунктир)

При расчете энергетических характеристик секции использовалась модель синхронных с волной точечных сгустков. Результаты расчетов с более реалистичной моделью сгустков будут приведены в следующем разделе.

Из приведенных данных видно, что секция обладает высоким электронным КПД при ускорении пучка с током 0,4 А, и при этом потери СВЧ-мощности в секции при нулевом токе распределены достаточно равномерно, как следует из Рис.2. На этом рисунке изображена мощность СВЧ-потерь на ячейку секции, так как основное выделение энергии происходит в диафрагмах и потери на единицу длины будут недостаточно информативны.

Проведенные оценки теплового режима секции показали, что такие потери СВЧ-мощности не представляют проблем при эксплуатации ускорителя. Следует заметить, что такой результат достигается за счет достаточно большой длины секции, однако это не является конструктивным ограничением в нашем случае.

Из Рис.3 видно, что в начальной части секции амплитуда волны резко увеличивается. Это необходимо для обеспечения хорошей группировки сгустков и достигается за счет того, что первые 4 ячейки банчера имеют радиус диафрагм 16 мм, а остальные

ячейки банчера – 14 мм. Моделирование с помощью модели связанных резонаторов показало, что при этом в секции возникают отражения (Рис.4). Для устранения этих отражений радиус пятой диафрагмы был выбран как среднее геометрическое между 16 и 14 мм, а именно: 14,967 мм. Как видно из Рис.5, отражение в секции практически отсутствует в этом случае.

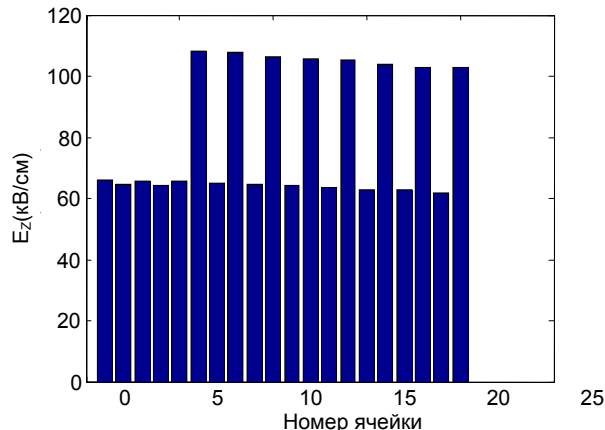


Рис.4. Распределение амплитуды поля в начальной части секции при скачкообразном увеличении радиуса диафрагм

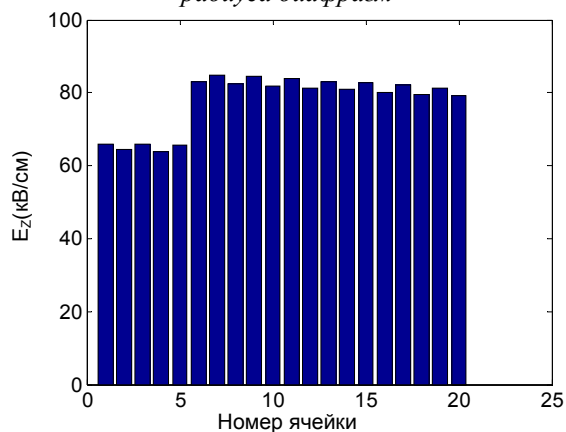


Рис.5. Распределение амплитуды поля в начальной части секции при использовании переходной ячейки

Для улучшения характеристик пучка, ускоряющая система снабжена предгруппирователем клистронного типа.

Транспортировка пучка в ускоряющей системе обеспечивается соленоидом. Для уменьшения потребляемой мощности соленоид снабжен магнитопроводом. Расчеты показывают, что для создания поля 0,1 Тл на оси соленоида потребуется мощность электропитания 400 Вт при выполнении обмотки из сплошной медной шины. Такая мощность может быть снята с соленоида за счет естественного охлаждения.

Схематичный вид ускоряющей системы в соленоиде изображен на Рис.6.

Охлаждение секции осуществляется при помощи 16 каналов, расположенных в теле секции. Из-за конструктивных особенностей соленоида (см. Рис.6) каналы соединены по возвратно-петлевой схеме, причем, входные и выходные патрубки располагаются в районе выходного трансформатора типа волны секции.

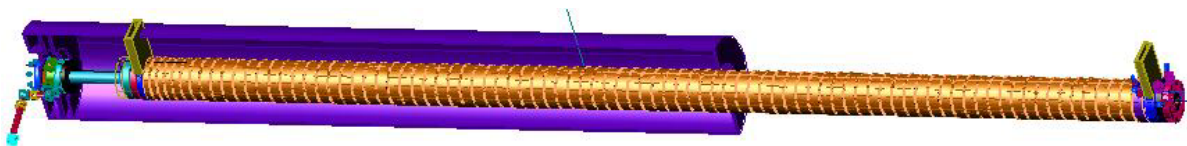


Рис.6. Схематическое изображение ускоряющей системы в соленоиде. Обмотки соленоида не показаны

Возвратно-петлевая схема охлаждения секции позволяет выровнять перепад температур вдоль секции, который возникает как за счет нагрева охлаждающей жидкости при поглощении выделяемого в секции тепла, так и при изменении распределения энерговыделения в секции за счет токовой нагрузки. Влияние изменения температуры секции на параметры пучка показано в следующем разделе.

2. САМОСОГЛАСОВАННАЯ ДИНАМИКА ЧАСТИЦ

Самосогласованная задача движения частиц в ускоряющей системе решалась для следующих параметров: начальная энергия частиц – 80 кэВ, входной ток – 0,44 А, мощность СВЧ-питания секции – 4,6 МВт, длительность СВЧ-импульса – 2,5 мкс, длительности фронта и среза СВЧ-импульса – 0,42 мкс, длительность импульса тока – 0,9 мкс, фронт и срез импульса тока – 21 нс, задержка импульса тока относительно СВЧ-импульса – 0,35 мкс, коэффициент связи резонатора предгруппирователя с фидером – 10, а его добротность и шунтовое сопротивление – 3000, и 3 МОм/м соответственно. Более короткие импульсы, по сравнению с эксплуатационными, были выбраны для уменьшения времени счета. Проверочное моделирование при рабочих значениях длительностей импульсов показало, что характеристики пучка на выходе ускоряющей системы практически совпадают с характеристиками, полученными для коротких импульсов при указанной выше задержке импульсов СВЧ и тока.

В результате моделирования были получены оптимальные значения амплитуды и фазы СВЧ-питания предгруппирователя, задержка импульсов тока и СВЧ-мощности, которая зависит, в частности, от длительностей фронтов импульсов. Кроме того, была подобрана конфигурация и величина фокусирующего магнитного поля, уточнен закон изменения фазовой скорости в группирователе.

Итогом исследований динамики пучка в ускоряющей системе стали следующие результаты. Система обеспечивает эффективную группировку и транспортировку частиц. Выхода ускоряющей секции достигают 89 % инжектированных частиц. Теряются, в основном, частицы с малой энергией в начальной части секции. Как видно из Рис.7, пучок имеет выраженное ядро в районе 10 МэВ и небольшое количество частиц с низкими энергиями. Энергетический спектр для такого распределения имеет характерный вид, который приведен на Рис.8. Здесь вклад в участок спектра с энергией выше 10 МэВ вносят также и частицы, которые ускоряются в переходных режимах. Максимальная энергия частиц составляет 10,6 МэВ, а их доля, с энергией больше 10 МэВ – 4,6 %. Низкоэнергетических частиц не очень много, 99 % частиц занимают интервал энергий 3,8 МэВ (Рис.9) в районе максимума спектра.

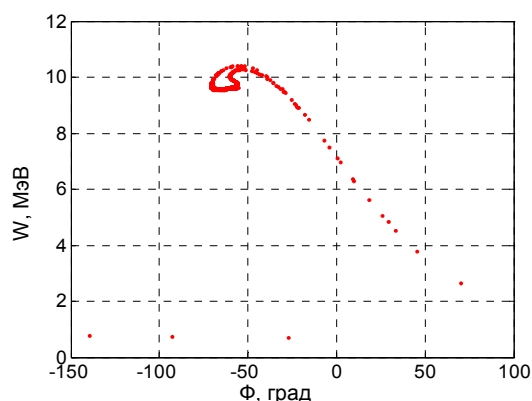


Рис.7. Фазо-энергетическое распределение частиц на выходе секции в установившемся режиме

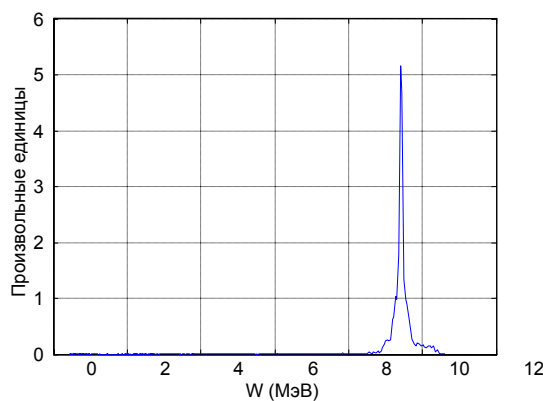


Рис.8. Интегральный энергетический спектр частиц на выходе ускоряющей секции при длительности тока 9 мкс

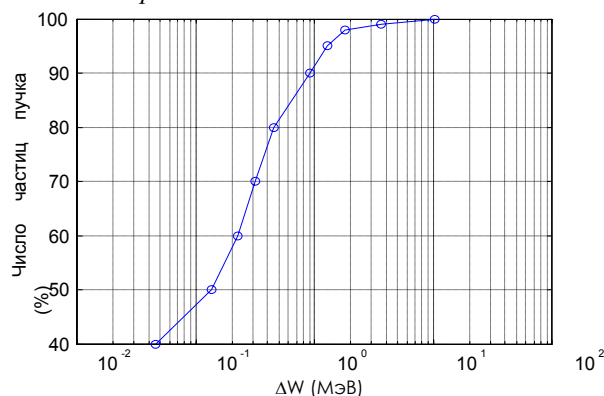


Рис.9. Максимальное количество частиц пучка, занимающих заданный интервал энергий

Поперечное движение частиц в ускоряющей системе достаточно сложное (Рис.10), так как мы практически не занимались согласованием входного пучка с каналом транспортировки в ускоряющую секцию. Моделирование показало, что изменение поперечных параметров входного пучка практически не влияет на коэффициент захвата, так как в процессе группировки теряются те частицы, энергия которых становится очень малой. Начальные попе-

речные характеристики частиц слабо влияют на этот процесс. Вместе с тем, поперечные размеры пучка много меньше размеров диафрагм секции.

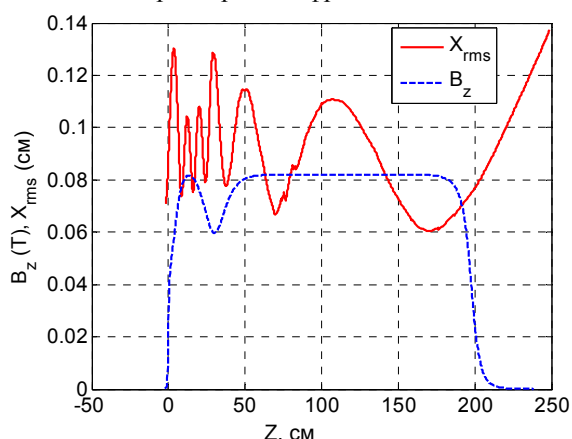


Рис.10. Огибающая пучка (сплошная кривая) и осевое магнитное поле вдоль ускоряющей системы

В выбранной конфигурации ускоряющей системы ограничена возможность фазирования сгустков относительно волны ускоряющего поля. В этой ситуации представляет интерес изучение фазового движения сгустков относительно волны. Нужно заметить, что в основной части секции фазовая скорость волны равна скорости света. Сгустки в конце группирователя не являются ультррелятивистскими. Для увеличения коэффициента захвата сгустки необходимо инжектировать в основную часть секции так, чтобы ядро сгустка находилось перед гребнем волны. В этом случае частицы из «хвоста» сгустка будут вначале ускоряться более эффективно, а за счет разности скоростей сгустка и волны, волна «догоняет» ядро сгустка. Таким образом, большее число частиц вовлекаются в процесс ускорения. Вместе с тем, при расчетном токе пучка амплитуда поля, которое возбуждают сгустки, сравнима в конце секции с полем, возбуждаемым генератором. В результате, фазовое движение частиц в суммарном поле может быть очень сложным. Это можно видеть на Рис.11, где представлено фазовое движение сгустков относительно суммарной волны при различных температурах секции. Кривая, обозначенная $\Delta T = 0^\circ\text{C}$, соответствует расчетной рабочей температуре секции, две другие кривые соответствуют нагретой секции на 3 и 5°C . Можно видеть, что в приведенных случаях сгусток не приближается асимптотически к гребню волны, а уходит от него. Максимальная мощность будет передана в пучок в случае, если на выходе секции сгусток будет на гребне волны. В этом случае амплитуда поля на выходе секции будет минимальна. В Табл.2 приведены характеристики пучка для этих трех случаев. Можно показать, что при $\Delta t = 3^\circ\text{C}$ электронный КПД выше на 0,5 %, а при $\Delta t = 5^\circ\text{C}$ на 0,7 % ниже, чем при расчетной температуре секции. С практической точки зрения такими изменениями характеристик пучка можно пренебречь.

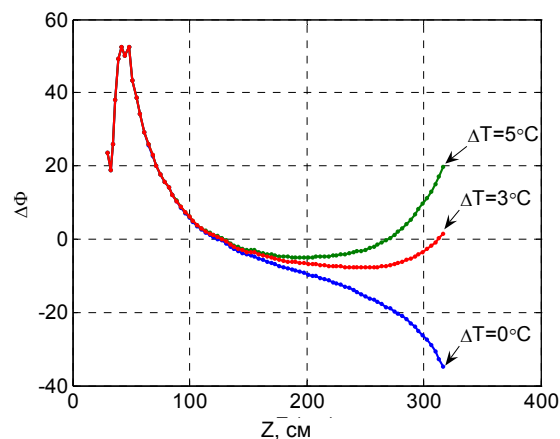


Рис.11. Разность фаз между первой гармоникой тока пучка и волной вдоль ускоряющей секции

Таблица 2

| Параметры | $\Delta t=0^\circ\text{C}$ | $\Delta t=3^\circ\text{C}$ | $\Delta t=5^\circ\text{C}$ |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Ток пучка, А | 0,389 | 0,390 | 0,390 |
| Средняя энергия, МэВ | 9,33 | 9,37 | 9,22 |
| Энергия в максимуме, МэВ | 9,44 | 9,41 | 9,23 |
| Энергетический спектр (99% част.), % | 51 | 39 | 44 |
| Энергетический спектр на половине высоты, % | 0,48 | 0,48 | 2,88 |
| Фазовый спектр (99 % част.), град | 150 | 137 | 91 |
| Диаметр (99 % част.), мм | 6,8 | 6,4 | 6,7 |
| Среднеквадратичный радиус, мм | 1,5 | 1,4 | 1,4 |
| Среднеквадратичный нормализованный эмиттанс, мм·мрад | 13 | 11 | 12 |

ВЫВОДЫ

Разработана ускоряющая система для модернизации ускорителя электронов ЛУ-10. Система может обеспечить среднюю мощность пучка 20 и более киловатт. Потери частиц в секции и выделяемая СВЧ-мощность не представляют проблем при эксплуатации ускорителя. Высокий электронный КПД секции и низкая мощность, необходимая для создания магнитного поля, позволяют надеяться на достижение высокого общего КПД ускорителя. Малые изменения характеристик пучка при нагреве секции в пределах $+5^\circ\text{C}$ от расчетной температуры упрощают систему охлаждения секции.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта НАН Украины № X-9-2 «Разработка линейных ускорителей электронов для решения задач ядерной энергетики и радиационных технологий».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. A.N. Dovbnya, M.I. Ayzatskiy, I.E. Biller, et. al. Electron-linac-based radiation facilities of the Ukrainian National Science Center "KIPT" // *Proc. of Particle Accelerator Conf.* – Vancouver. 1997, p.3810-3812.
2. J.H. Billen and L.M. Young. POISSON / SUPERFISH on PC compatibles // *Proc. 1993 Particle Accelerator Conf.* Washington (USA). 1993, p.790-792.
3. L.M. Young. *PARMELA*. Los Alamos, 1996, с.93. (preprint / Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-1835).
4. V.V. Mytrochenko, A. Opanasenko. Study of transient self-consistent beam dynamics in RF linacs using a particle tracing code // *NIM*. 2006, A 558, p.235-239.
5. О.А. Вальднер, А.Д. Власов, А.В. Шальнов. *Линейные ускорители*. М.: «Атомиздат», 1969.
6. O.A. Valdner, A.V. Shalnov, A.N. Didenko. *Accelerating wave guides*, М.: «Atomizdat», 1973.
7. M.I. Ayzatskiy and E.Z. Biller. Development of inhomogeneous disk-loaded accelerating waveguides and RF-coupling // *Proc. of LINAC 96*, Geneva, 1996, p.119-121.

Статья поступила в редакцию 05.10.2011 г.

ACCELERATING SYSTEM FOR AN INDUSTRIAL LINAC

M.I. Ayzatskiy, A.N. Dovbnya, V.F. Ziglo, K.Yu. Kramarenko, V.A. Kushnir, V.V. Mytrochenko, S.A. Perezhogin, A.N. Opanasenko

The results of the development of the accelerating S-band system consisted of the 80 kV diode gun, klystron type prebuncher and disk loaded waveguide (DLW) with phase advance of $2\pi/3$ per cell a presented in the paper. The initial part of the DLW represents the waveguide tapered phase a velocity bunchere. To ensure low losses of the beam, the system is equipped with an external magnetic field. It is planned to use an industrial klystron with pulsed power of up to 5 MW and an average power of 36 kW as a source of RF power. According to calculations, the beam current at the output of the system is about 90 % of the gun current. At output beam current of 0.39 A particle energy is 9.4 MeV.

ПРИСКОРЮЮЧА СИСТЕМА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОНІВ

М.І. Айзацький, А.М. Довбня, В.Ф. Жигло, К.Ю. Крамаренко, В.А. Кушнір, В.В. Митроченко, С.А. Пережогін, А.Н. Опанасенко

Наведено результати розробки прискорюючої системи 10 см-діапазону, що складається з 80 кВ діодної гармати, передгрупувача клістронного типу та круглого діафрагмованого хвилеводу (КДХ) з видом коливань $2\pi/3$. Початкова частина КДХ являє собою хвилевідний групувач зі змінною фазовою швидкістю. Для забезпечення малих втрат пучка система поміщена в зовнішнє магнітне поле. В якості джерела надвисокочастотної (НВЧ) потужності планується застосування промислового клістрона з імпульсною потужністю до 5 МВт і середньою потужністю до 36 кВт. Згідно з розрахунками, струм пучка на виході системи складає близько 90 % струму гармати. При вихідному струмі пучка 0,39 А енергія частинок складає 9,4 МеВ.