

УДК 621.384.663

DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-2-5-20

Исследование параметров мощного электронного пучка промышленного ускорителя ЭЛВ

**Е. В. Домаров, Д. С. Воробьев, М. Г. Голковский, Ю. И. Голубенко, А. И. Корчагин
Н. К. Куксанов, А. В. Лаврухин, П. И. Немытов, Р. А. Салимов, А. В. Семенов
А. В. Сорокин, С. Н. Фадеев, И. К. Чакин, В. Г. Черепков**

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия*

Аннотация

Проведен анализ факторов, влияющих на диаметр и угол расходимости электронного пучка на выходе из ускорительной трубки промышленного ускорителя серии ЭЛВ. Проведены измерения параметров мощного электронного пучка вплоть до мощности 100 кВт. На основе полученных данных спроектирован и предварительно испытан новый тип газодинамического выпускного устройства, способного эффективно выводить сфокусированный электронный пучок в атмосферу.

Ключевые слова

ЭЛВ, диаметр пучка, угол расходимости, выпускное устройство

Для цитирования

Домаров Е. В., Воробьев Д. С., Голковский М. Г., Голубенко Ю. И., Корчагин А. И., Куксанов Н. К., Лаврухин А. В., Немытов П. И., Салимов Р. А., Семенов А. В., Сорокин А. В., Фадеев С. Н., Чакин И. К., Черепков В. Г. Исследование параметров мощного электронного пучка промышленного ускорителя ЭЛВ // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 2. С. 5–20. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-2-5-20

Research of Parameters of the Powerful Electron Beam of Industrial Accelerator ELV

**E. V. Domarov, D. S. Vorobyov, M. G. Golkovsky, Yu. I. Golubenko, A. I. Korchagin
N. K. Kuksanov, A. V. Lavrukhin, P. I. Nemytov, R. A. Salimov, A. V. Semenov
A. V. Sorokin, S. N. Fadeev, I. K. Chakin, V. G. Cherepkov**

*Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

Abstract

This article deals the factors affecting the diameter and angle of divergence of the electron beam at the exit from the accelerator tube of an industrial ELV series accelerator. Measurements of the parameters of a high-power electron beam were carried out up to a power of 100 kW. On the basis of the data obtained, a new type of gas-dynamic extraction device was designed and pre-tested, which can efficiently output a focused electron beam to the atmosphere.

Keywords

ELV, beam diameter, divergence angle, extraction device

For citation

Domarov E. V., Vorobyov D. S., Golkovsky M. G., Golubenko Yu. I., Korchagin A. I., Kuksanov N. K., Lavrukhin A. V., Nemytov P. I., Salimov R. A., Semenov A. V., Sorokin A. V., Fadeev S. N., Chakin I. K., Cherepkov

© Е. В. Домаров, Д. С. Воробьев, М. Г. Голковский, Ю. И. Голубенко, А. И. Корчагин,
Н. К. Куксанов, А. В. Лаврухин, П. И. Немытов, Р. А. Салимов, А. В. Семенов,
А. В. Сорокин, С. Н. Фадеев, И. К. Чакин, В. Г. Черепков, 2019

kov V. G. Research of Parameters of the Powerful Electron Beam of Industrial Accelerator ELV. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 2, p. 5–20. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-2-5-20

Введение

Более 30-ти лет в Институте ядерной физики (ИЯФ) СО РАН на ускорителе типа ЭЛВ-6 успешно работает выпускное газодинамическое многоступенчатое устройство, через которое выводится в атмосферу сфокусированный пучок электронов. Этот ускоритель уже 9 лет имеет статус уникальной научной установки¹. В нем используется ускорительная трубка с магнитным сопровождением электронного пучка. Магнитное сопровождение обеспечивается линзами на постоянных магнитах, установленных внутри ускорительной трубки. Конструкция и изготовление таких ускорительных трубок достаточно сложны. В настоящее время в ускорителях ЭЛВ используются более простые и надежные ускорительные трубки без магнитного сопровождения. Они имеют относительно большую апертуру (100 мм) и изготавливаются серийно. С учетом высокой надежности серийных ускорительных трубок, а также в связи с утратой технологии изготовления трубок с магнитным сопровождением была поставлена задача о возможной замене в ускорителе с выводом в атмосферу сфокусированного пучка ускорительной трубки с магнитным сопровождением на ускорительную трубку с большой апертурой без магнитного сопровождения.

Система газодинамического вывода сфокусированного пучка состоит из нескольких камер, разделенных диафрагмами с малыми (несколько миллиметров) отверстиями, сквозь которые проходит пучок. Из этих камер вакуумными насосами системы дифференциальной откачки производится непрерывное удаление газа, поступающего через отверстия. Это позволяет достичь приемлемого вакуума $10^{-6} - 10^{-7}$ Торр [1] в последней камере, примыкающей к ускорительной трубке. В ускорительной трубке с магнитными линзами диаметр пучка нигде не превышает диаметра катода, равного 10 мм, а угол расходимости на выходе составляет $|\alpha_0| \leq 2 \cdot 10^{-2}$ рад. Тот факт, что диаметр пучка ограничен, позволил использовать канал магнитного сопровождения с линзами и за пределами ускорительной трубки. Этот канал в виде трубки диаметром 20 мм и длиной 400 мм служит вакуумным сопротивлением с проводимостью 2 л/с. Это позволяет иметь перепад давления между ускорительной трубкой и последней ступенью дифференциальной откачки ≈ 250 , поскольку трубка откачивается магниторазрядными насосами общей производительностью 500 л/с.

Для ускорительной трубки с большой апертурой (≈ 100 мм) использовать вакуумное сопротивление в виде трубки диаметром 20 мм и длиной 400 мм чрезвычайно опасно, так как размер пучка в некоторых режимах может превысить 20 мм и произойдет «прожиг» трубки. В связи с этим первым этапом работы по разработке нового выпускного устройства для сфокусированного пучка явились анализ движения пучка и измерение его параметров (диаметра пучка d_0 и угла его расходимости α_0) на выходе ускорительной трубки. Необходимо было понять возможность вывода в атмосферу сфокусированного электронного пучка через систему из нескольких диафрагм. Первые эксперименты по измерению параметров пучка проводились на ускорителе с фольговым выпускным устройством [2]. По результатам этих измерений в дальнейшем производились выбор оптической схемы выпускного газодинамического устройства и оценка минимального диаметра сфокусированного пучка, а соответственно и размера отверстий в диафрагмах выпускного устройства.

Анализ движения пучка

Ускорительные трубки с большой апертурой представляют собой секционированный набор нержавеющей дисковых электродов с апертурой канала ускорения 100 мм, разделенных

¹ <http://ckp-rf.ru/usu/200984/>

между собой керамическими изоляторами, выполненными из ультрафарфора. Вакуумно-плотное соединение электродов с керамикой производится с помощью высокомолекулярного клея ПВА. Склеенные электроды и изоляторы образуют секционированные металлокерамические элементы ускорительной трубки. В целом ускорительная трубка состоит из нескольких металлокерамических элементов, соединяющихся через специальные переходники с резиновым вакуумным уплотнением. Количество металлокерамических изоляторов и их общая длина определяются параметрами конкретного ускорителя, главным из которых является максимальная энергия ускоренных электронов. Длина ускорительной трубки в первом приближении пропорциональна максимальной энергии и лежит в пределах от 600 до 2700 мм для разных типов ускорителей. Напряженность электрического поля в ускорительной трубке не превышает 10 кВ/см. Эксперименты проводились на ускорителе ЭЛВ-4 с максимальной энергией 1,5 МэВ, длина трубки которого составляет 1800 мм. Посредством горловины ускорительная трубка соединяется с вакуумной системой и далее с выпускным газодинамическим устройством с дифференциальной откачкой или с серийным фольговым выпускным устройством. Распределение потенциала по электродам трубки осуществляется с помощью высокоомного делителя. Максимальный ток делителя не превышает 70 мкА. Геометрия прикатодной области ускорительной трубки приведена на рис. 1. Инжектор электронов состоит из катода (эмитирующая таблетка LaB_6 диаметром 10 мм), тепловых экранов и прикатодного электрода (плоский либо в геометрии Пирса). Величина тока пучка регулируется изменением температуры катода. Нагрев катода осуществляется вольфрамовой спиралью диаметром 9 мм на длине 10 мм, имеющей 8 витков. Максимальный ток накала спирали составляет 12 А. Два электрода трубки (№ 2 и 4) имеют апертуру 20 мм, а все остальные – 100 мм [3; 4].

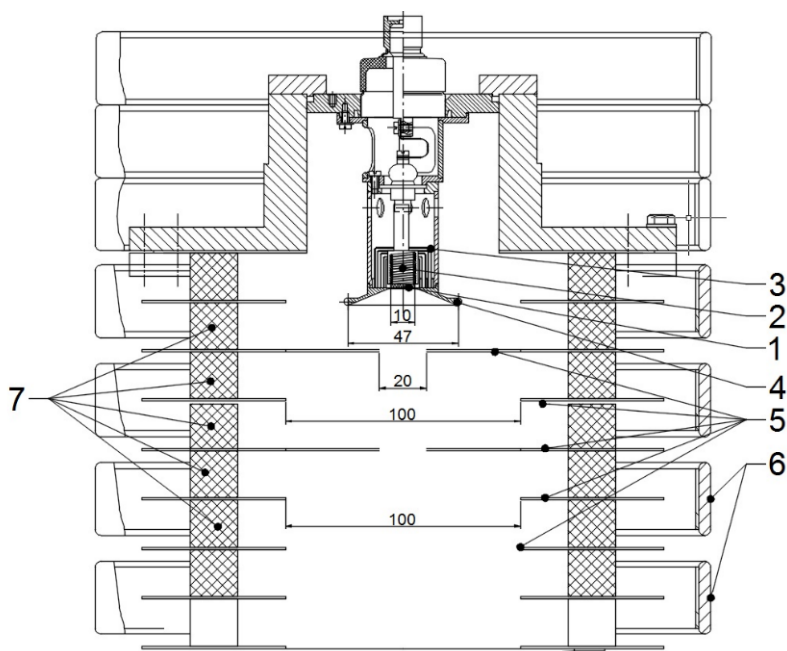


Рис. 1. Прикатодная часть ускорительной трубки:

1 – катод; 2 – подогреватель катода; 3 – тепловые экраны; 4 – прикатодный электрод;
5 – электроды ускорительной трубки; 6 – экранирующие кольца; 7 – керамический изолятор

Fig. 1. Cathode Part of the Accelerating Tube:

1 – the cathode; 2 – cathode heater; 3 – heat shields; 4 – cathode electrode;
5 – electrodes of the accelerating tube; 6 – shielding rings; 7 – ceramic insulator

На размер пучка и его угловую расходимость, на выходе ускорительной трубки оказывают влияние следующие основные факторы:

- 1) продольное электрическое поле (осуществляет основную фокусировку пучка);
- 2) собственное магнитное поле подогревателя накала (пучок приобретает азимутальный импульс $P\phi^0$);
- 3) технология заделки катода (в пучке появляются частицы с нелинейными углами);
- 4) объемный заряд пучка;
- 5) рассеяние электронов на остаточном газе;
- 6) пульсации ускоряющего напряжения;
- 7) aberrации электромагнитных линз (они также влияют на оптимальный размер отверстий в диафрагмах выпускного устройства);
- 8) проникновение поперечной компоненты магнитного поля первичной и вторичной обмоток трансформатора, что приводит к колебаниям пучка и ведет к необходимости увеличения отверстий в диафрагмах.

Расчеты проводились с помощью программы SAM, разработанной в ИЯФ СО РАН [5]: учитывалось влияние собственного магнитного поля накала, проверялось влияние потенциала электродов № 2 и 4 на параметры пучка, заделки таблетки LaB₆ и формы прикатодного электрода.

Распределение потенциала вдоль ускорительной трубки показано на рис. 2. Вблизи высоковольтного края трубки формируется так называемый «затвор», т. е. создается минимум потенциала, который препятствует ускорению вторичных частиц, появляющихся в результате ионной бомбардировки электрода № 4 с апертурой 20 мм.

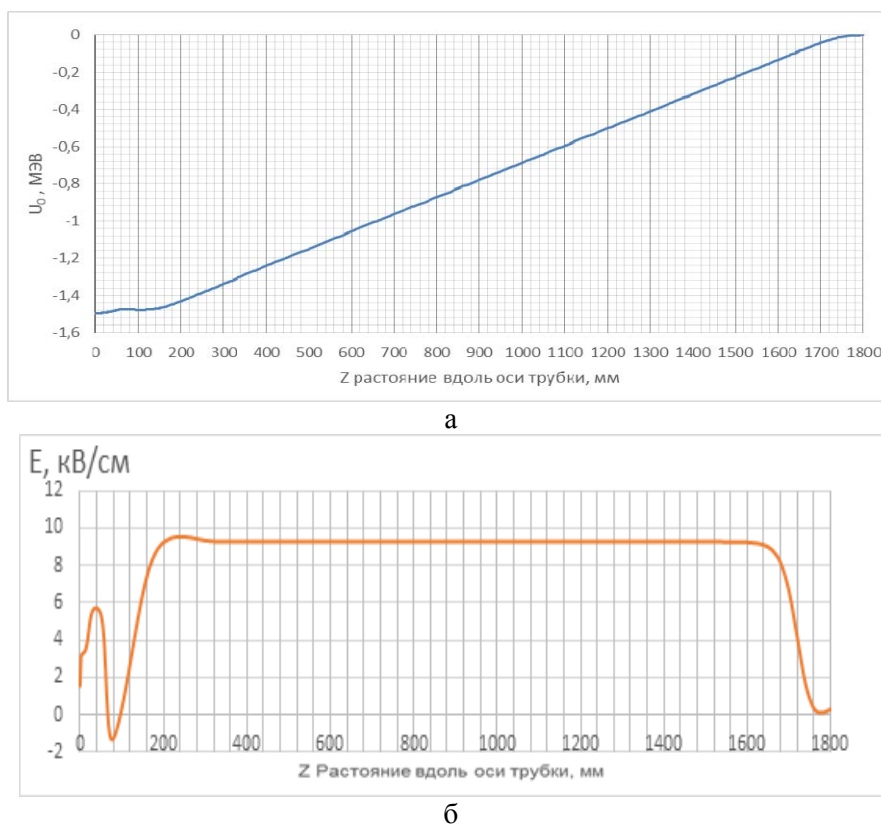


Рис. 2. Распределение потенциала (а) и электрического поля (б) вдоль оси ускорительной трубки
Fig. 2. Potential Distribution (a) and Electric Field (b) Along the Axis of the Accelerator Tube

Распределение электрического поля на оси трубки неравномерно. При нарастании электрического поля происходит фокусировка пучка, а при уменьшении поля – пучок дефокусируется. Можно выделить три характерных участка. Катод расположен в точке 0. Первый участок от 0 до 200 мм. На этом участке пучок последовательно испытывает фокусировку, дефокусировку и вновь фокусировку. Интегрально этот участок является сильно фокусирующим и оказывает наибольшее влияние на параметры пучка на выходе трубки. На втором участке (200–1 700 мм) электрическое поле однородно, и фокусировка отсутствует. На третьем участке – выход трубки – электрическое поле уменьшается до 0, и образуется дефокусирующая линза с фокусным расстоянием примерно $4 \cdot L_{тр}$ (где $L_{тр}$ – длина трубки), т. е. примерно 7 м. На рис. 3 приведены расчетные огибающие пучка для оптимальной геометрии электрического поля.

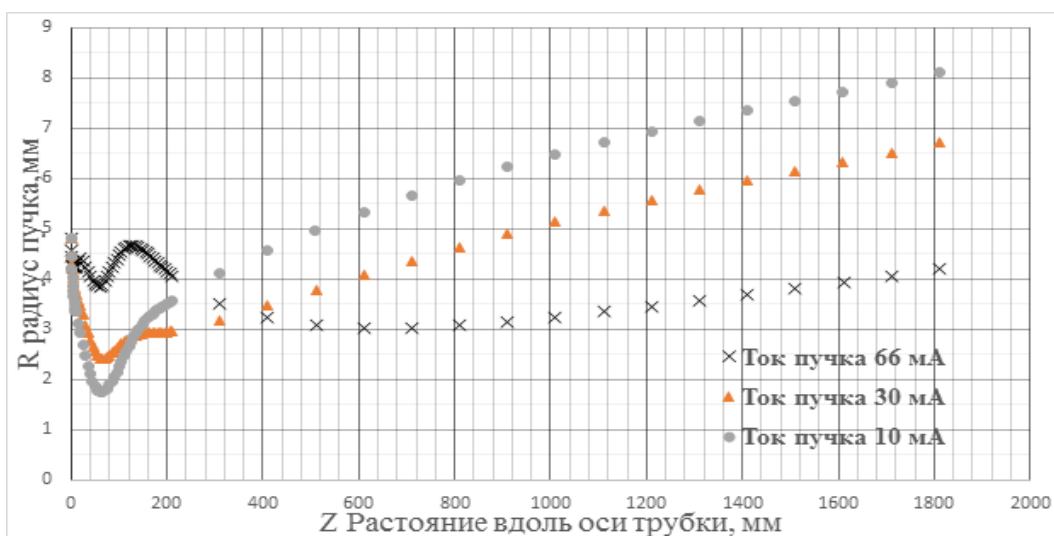


Рис. 3. Огибающие для разных токов пучка на энергии 1,5 МэВ, длина ускорительной трубки составляет 1 800 мм

Fig. 3. Envelopes for Different Beam Currents at an Energy of 1.5 MeV, the Length of the Accelerating Tube Is 1 800 mm

Эмитирующая таблетка LaB_6 , радиус которой составляет $R_{табл} = 5$ мм, отстоит примерно на 2 мм от края спирали подогревателя, и на ее поверхности индуцируется магнитное поле, имеющее осевую B_z и радиальную $B_r = \frac{r_{табл}}{2} \frac{dB_z}{dz}$ компоненты. На рис. 4 показано распределение магнитного поля по z для радиуса 5 мм.

Общеизвестно: если электронный пучок рождается в магнитном поле, то его невозможно идеально сфокусировать (до нуля) в пространстве без магнитного поля. Рассмотрим подробнее и оценим влияние указанного магнитного поля на размер пучка в выходных диафрагмах. При движении в рассматриваемом поле за счет поперечной компоненты B_r электрон приобретает азимутальный импульс P_ϕ^0 примерно 4,4 Гс·см. При радиусе траектории 5 мм получается момент импульса 2,2 Гс·см². Эта величина является адиабатическим инвариантом, т. е. остается постоянной при всех дальнейших преобразованиях пучка. Действительно, при свободном движении в плоскости R, ϕ при сохранении полного импульса его компоненты преобразуются (рис. 5, а): импульс P_ϕ в точке 1 имеет азимутальную компоненту $P_\phi^1 = P_\phi^0 \cdot \cos \alpha$ и радиальную $P_r^1 = P_\phi^0 \cdot \sin \alpha$. Здесь α – угол между направлением от оси на точку вылета 0

(радиус $R_{\text{табл}}$) и направлением на текущую координату – точку 1 с радиусом $R_1 = R_{\text{табл}} / \cos \alpha$. В результате получаем сохранение $P_\phi^1 \cdot R_1 = P_\phi^0 \cdot R_{\text{табл}}$.

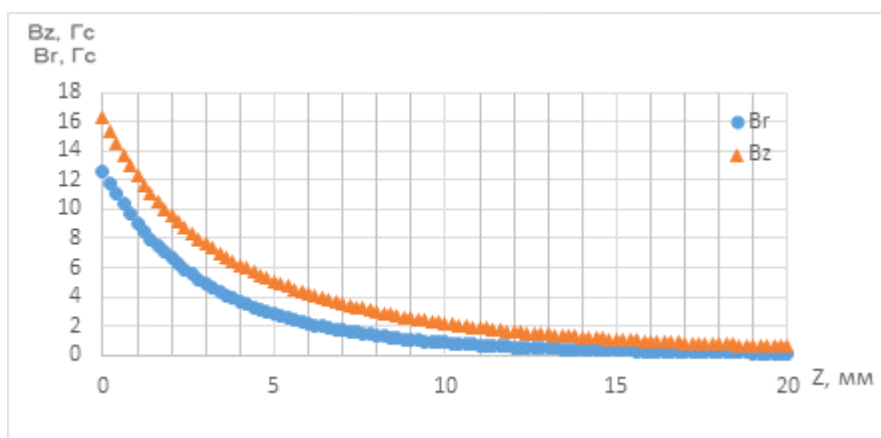


Рис. 4. Магнитное поле спирали подогревателя инжектора электронов (координата $z = 0$ соответствует эмитирующей поверхности таблетки)
Fig. 4. The Magnetic Field of the Spiral of the Electron Injector Heater (The coordinate $z = 0$ corresponds to the emitting surface of the cathode)

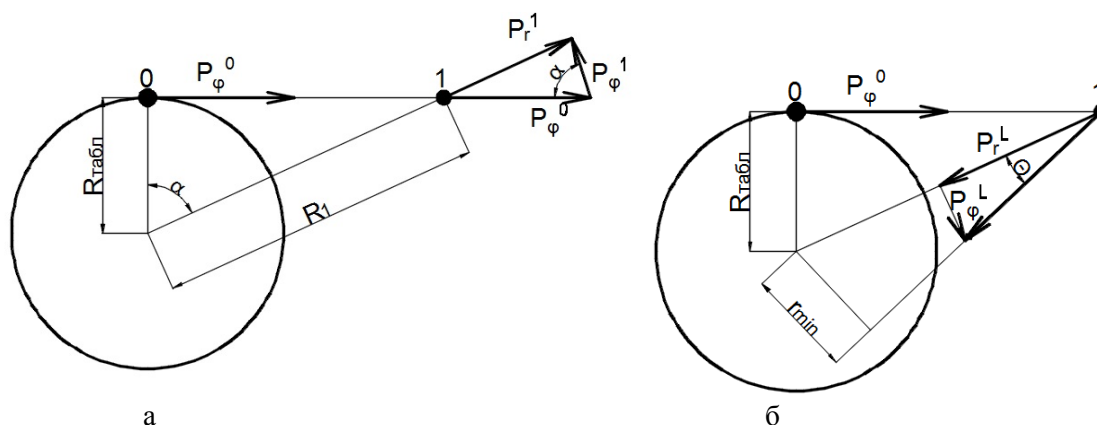


Рис. 5. Влияние магнитного поля накала на динамику пучка:
а – свободное пространство; б – движение после короткой линзы
Fig. 5. Influence of the Magnetic Field on the Beam Dynamics:
а – free space; б – movement after a short lens

Предположим, что в точке 1 установлена линза с фокусным расстоянием F . На выходе линзы (индекс L) импульс электрона будет иметь следующие компоненты (рис. 5, б): азимутальный импульс P_ϕ^L не изменился и равен $P_\phi^0 \cdot \cos \alpha$, радиальный импульс поменялся:

$$P_r^L = -P_0 \cdot R_1 / F + P_r^1 = -P_0 \cdot R_1 / F + P_\phi^0 \cdot \sin \alpha = -P_0 \cdot R_1 / F + P_\phi^0 \cdot (1 - (R_{\text{табл}} / R_1)^2)^{1/2}$$

Здесь P_0 – полный импульс электрона; F – фокусное расстояние линзы, которое составляет примерно 180 мм. Из-за наличия азимутального импульса P_ϕ^L траектория электрона пройдет мимо оси, минимальное расстояние (а следовательно, и размер пучка) будет:

$$R_{\text{min}} = R_1 \cdot \text{tg} \theta = (R_1 \cdot P_\phi^L \cdot R_{\text{табл}} / R_1) / (R_1 \cdot P_0 / F - P_\phi^0 \cdot (1 - (R_{\text{табл}} / R_1)^2)^{1/2})$$

где θ – угол между P_r^L и P_ϕ^L . $\text{tg } \theta = P_\phi^L / P_r^L$. В нашем случае почти случайно оказалось $R_{\text{табл}} = R_1$, поэтому для R_{min} получаем

$$R_{\text{min}} = (R_1 \cdot P_\phi^0 / (R_1 \cdot P_0 / F)) = F \cdot P_\phi^0 / P_0$$

Учитывая, что в параксиальном приближении $P_\phi^0 \sim \frac{1}{2} \cdot B_{\text{табл}} \cdot R_{\text{табл}}$, а $P_0 \sim (B\rho)_0$,

$$R_{\text{min}} = \frac{1}{2} \cdot F \cdot (B_{\text{табл}} \cdot R_{\text{табл}}) / (B\rho)_0$$

Для энергии 1,5 МэВ $(B\rho)_0$ равно $6,5 \cdot 10^3$ Гс·см. Тогда минимальный диаметр сфокусированного пучка составит примерно 0,25 мм. Таким образом, для конструкции устройства вывода сфокусированного пучка влияние магнитного поля накала незначительно, но важно для правильного понимания динамики пучка. Отметим, что благодаря наличию P_ϕ^0 частицы пучка в трубке нигде не пересекают ее ось.

Таблетка LaB₆ завальцована (заделана) в танталовую обойму, в результате между поверхностью таблетки и обоймой образуется уступ величиной 0,2–0,3 мм. Кроме того, при длительной работе в результате диффузии бора в тантал происходит деформация танталовой обоймы, и величина уступа несколько увеличивается. Как уже упоминалось, на ускорителях ЭЛВ катод работает в режиме отбора полного тока термоэмиссии. Это благоприятно сказывается на работе катода и обеспечивает достаточно простое управление током пучка путем изменения температуры подогревателя. Однако при этом размер пучка на выходе трубки зависит от величины тока пучка из-за влияния его объемного заряда. Традиционно в ЭЛВ используется прикатодный электрод в геометрии «Пирс». Это название достаточно условно, и с прикатодным электродом в геометрии Пирса его объединяет лишь то, что он является коническим с углом, близким к углу Пирса. Расчеты, а впоследствии и измерения параметров пучка, показали, что оптимальным в смысле влияния заделки катода и объемного заряда является плоский прикатодный электрод. Расчеты также позволили подобрать оптимальное напряжение первого к катоду электрода, другими словами, напряженность электрического поля на катоде. Увеличение напряженности усиливает влияние заделки, а уменьшение – усиливает влияние объемного заряда. Расчетным путем определено оптимальное положение (заглубление) таблетки относительно плоскости прикатодного электрода. Далее приведены расчетные и измеренные размеры пучка $d_{\text{расч}}$ и $d_{\text{изм}}$ на выходе ускорительной трубки для разных токов пучка.

Расчетные и измеренные диаметры пучка на выходе из трубки
(плоский прикатодный электрод диаметром 75 мм)
Calculated and Measured Beam Diameters at the Tube Exit
(flat electrode with a diameter of 75 mm)

Диаметр пучка	Ток пучка, мА		
	10	30	66
$d_{\text{расч}}$, мм	16	13	8,4
$d_{\text{изм}}$, мм	10	9,9	7,3

Как следует из таблицы, количественное соответствие между расчетами и измерениями не очень высокое. Однако качественно поведение пучка полностью соответствует расчету. Одним из объяснений является то, что при малых токах эмитирует не вся таблетка, а лишь центральная ее часть.

Рассмотрим влияние эмиттанта, связанного с температурой катода, на диаметр пучка в плоскости диафрагмы. Величина температурного эмиттанта $\varepsilon_T = \frac{d_k \Delta P_k}{P_0} = d_k \cdot \alpha_k$, ($\alpha_k = \frac{\Delta P_k}{P_0}$),

где d_k – диаметр катода, ΔP_k – разброс поперечных импульсов, обусловленный температурой катода, P_0 – конечный импульс электронов. Расходимость пучка в кроссовере при его полной энергии после линзы равна d_l / f_l ; где d_l – диаметр пучка на входе в линзу, а f_l – фокусное расстояние линзы, поэтому $d_{\min} = \frac{\varepsilon_T \cdot f_l}{d_l}$. При $d_l = 10$ мм, $f_l = 180$ мм и $\varepsilon_T = 3 \cdot 10^{-3}$ рад мм

имеем $d_{\min} \approx 0,05$ мм. Эта величина кажется пренебрежимо малой, однако следует учесть, что поток тепла, который может принять медная диафрагма до ее плавления, не превышает 1 кВт. Мощность же пучка – 100 кВт. Это значит, что для устойчивой работы диафрагмы допускается попадание на нее лишь 1 % от потока ускоренных электронов. Другими словами, нашу оценку d_{\min} надо увеличить примерно в 5 раз, следовательно, диаметр пучка по уровню 0,99 от полной мощности составит $5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 = 0,25$ мм.

При рабочем вакууме в ускорительной трубке $(1-5) \cdot 10^{-6}$ Торр часть электронов рассеивается на молекулах остаточного газа и попадает на электроды трубки. Из опыта работы с фольговыми выпускными устройствами было известно, что это не слишком большая часть пучка, и она не окажет существенного влияния на работу диафрагм. По нашей просьбе, В. А. Таюрским был проделан расчет рассеяния пучка в ускорительной трубке. Результаты расчета показали, что доля частиц, способных попасть на электроды, ничтожна. Реально при работе с пучком изменение тока делителя трубки (как за счет рассеяния пучка, так и за счет ореола) не превышает 10^{-5} от полного тока пучка.

Пульсации ускоряющего напряжения в данном ускорителе электронов изначально предполагались на уровне 5 %. Пульсации энергии приводят к тому, что фокусное расстояние линзы меняется с частотой пульсации, что приводит к увеличению диаметра пучка в кроссовере:

$$d_{\min} = d_l \frac{\Delta f}{f},$$

где d_{\min} – минимальный диаметр сфокусированного пучка, см; d_l – диаметр пучка на входе в линзу, который составляет 10 мм.

При энергии 1,5 МэВ $\frac{\Delta f}{f} \sim \frac{\Delta U}{U}$, тогда при пульсациях энергии $\frac{\Delta U}{U} \approx 5 \cdot 10^{-2}$ эффективный

диаметр пучка в первой диафрагме на выходе из выпускного устройства будет $\approx 0,5$ мм.

В трубку, которая расположена внутри высоковольтного выпрямителя и первичной обмотки, проникает поперечное магнитное поле, связанное с наклоном или несоосностью ускорительной трубки и первичной или вторичной обмоток трансформатора. Величина его может достигать $B_{\perp} = 0,2$ Гс. Это приводит к появлению переменных углов $\Delta\alpha$ на выходе из ускорительной трубки:

$$\Delta\alpha = \frac{B_{\perp} \cdot L_{\text{тр}}}{B\rho_0} = \frac{0,2 \cdot 180}{6,5 \cdot 1000} = 5,5 \cdot 10^{-3},$$

где B_{\perp} – поперечное магнитное поле первичной обмотки, $L_{\text{тр}}$ – длина ускорительной трубки, которая составляет 1800 мм, $B\rho_0$ – импульс электронов, который составляет для энергии пучка 1,5 МэВ величину $6,5 \cdot 10^3$ Гс·см,

Если бы пучок попадал в линзу только со смещением параллельно оси линзы, то это практически не повлияло бы на его размер в кроссовере, но, если имеются переменные углы $\Delta\alpha$, возникают колебания эффективного размера $\Delta d_{\min} = f_l \cdot \Delta\alpha$, где f_l – фокусное расстояние линзы 180 мм. В нашем случае колебания пучка в выходной диафрагме составят $\Delta d_{\min} \approx$

$\approx 5 \cdot 10^{-3} \cdot 18 = 9 \cdot 10^{-2}$ см = 0,9 мм. Это увеличивает площадь отверстия в диафрагме, через которое проходит газ. Для подавления таких колебаний разработан специальный электронный блок, сигнал которого компенсирует осцилляции пучка.

В первых ступенях выпускного устройства заметное влияние оказывает многократное рассеяние пучка на газе, который поступает в объем из выходной диафрагмы. Предварительные оценки дают увеличение размера пучка на ≈ 1 мм. Если просуммировать все перечисленные эффекты, то минимальный размер пучка на выходе из выпускного устройства составит примерно 2 мм.

Измерение параметров пучка

Измерение параметров мощного электронного пучка вплоть до мощности $P = 100$ кВт проводилось на серийном ускорителе ЭЛВ-4 двумя методами. Первый – импульсный метод. Пучок импульсно со временем $\tau \approx 520$ мкс смещается на массивную изолированную медную диафрагму с диаметром отверстия 50 мм. Ток диафрагмы регистрируется осциллографом. Удобно оказалось измерять не ток катушки отклонения, а напряжение заряда конденсатора, который создает импульс тока в катушке отклонения. Смещение пучка от оси пропорционально его величине. На рис. 6 показана зависимость тока диафрагмы I_d от напряжения заряда конденсатора питания катушки смещения пучка U_c . При этой методике базовым размером измерения служит диаметр внутреннего отверстия диафрагмы $D_d = 50$ мм. Поскольку диаметр пучка много меньше размера отверстия в диафрагме, расстояние между положениями пучка, которые соответствуют разности потенциалов $U_{1/2}$ по уровню $\frac{1}{2} \cdot I_d$, как раз и равно внутреннему диаметру диафрагмы D_d , а ΔU – диаметру пучка D_b . Диаметр пучка определяется по формуле

$$D_{\text{пуч}} = D_d (\Delta U / U_{1/2})$$

Из рис. 6: $\Delta U = 70$ В, $U_{1/2} = 560$ В, получаем диаметр сфокусированного пучка $D_{\text{пуч}} = 5(70/560) \approx 0,6$ (см) = 6 мм.

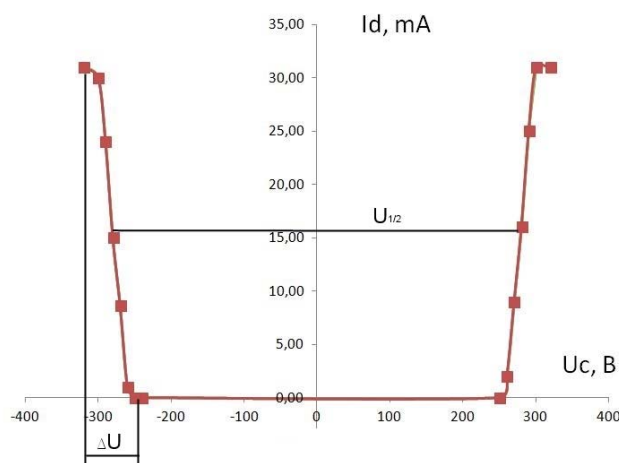


Рис. 6. График тока, попадающего на диафрагму I_d , в зависимости от напряжения заряда конденсатора U_c . Энергия электронов $E = 1$ МэВ, ток пучка 40 мА, ток линзы 1 А

Fig. 6. The graph of the current falling on the diaphragm I_d , depending on the charge voltage of the capacitor U_c . Electron energy $E = 1$ MeV, beam current 40 mA, lens current 1 A

Примененный метод показал, что эмиттанс пучка позволяет сфокусировать его в размер заведомо меньше 10 мм при фокусном расстоянии линзы около 1 500 мм практически во всех требуемых режимах работы ускорителя.

Для более точного измерения параметров пучка была изготовлена водоохлаждаемая диафрагма с диаметром отверстия 16 мм. Размер определялся касанием диафрагмы пучком в точках, находящихся на противоположных концах отверстия диафрагмы. Величина токооседания на диафрагму составляла 10^{-3} от полного тока пучка. Здесь удобнее было фиксировать не напряжение питания, а токи отклоняющих (корректирующих) катушек. Предварительно была произведена их калибровка. Для прохождения электронным пучком вдоль диаметра диафрагмы 16 мм девиация тока отклоняющих катушек составила 580 мА. В точках касания фиксировались значения токов отклоняющих катушек I_1 , I_2 , после чего вычислялся диаметр пучка $D_{\text{пуч}}$ в диафрагме по следующей формуле:

$$D_{\text{пуч}} = 1,6 - \frac{1,6 \cdot (I_1 - I_2)}{580}.$$

Так, например, при касании электронным пучком с энергией 1,5 МэВ и током в пучке 66 мА, при токе в линзе 1,7 А, измеренные токи катушек смещения составили $I_1 = 206$ мА и $I_2 = -199$ мА, тогда $D_{\text{пуч}} = 1,6 - \frac{1,6 \cdot (208 + 199)}{580} = 0,48$ см = 4,8 мм.

Результаты измерений диаметра пучка с энергией 1,5 МэВ при токах пучка 10, 30, 66 мА и разных токах фокусирующей электромагнитной линзы приведены на рис. 7.

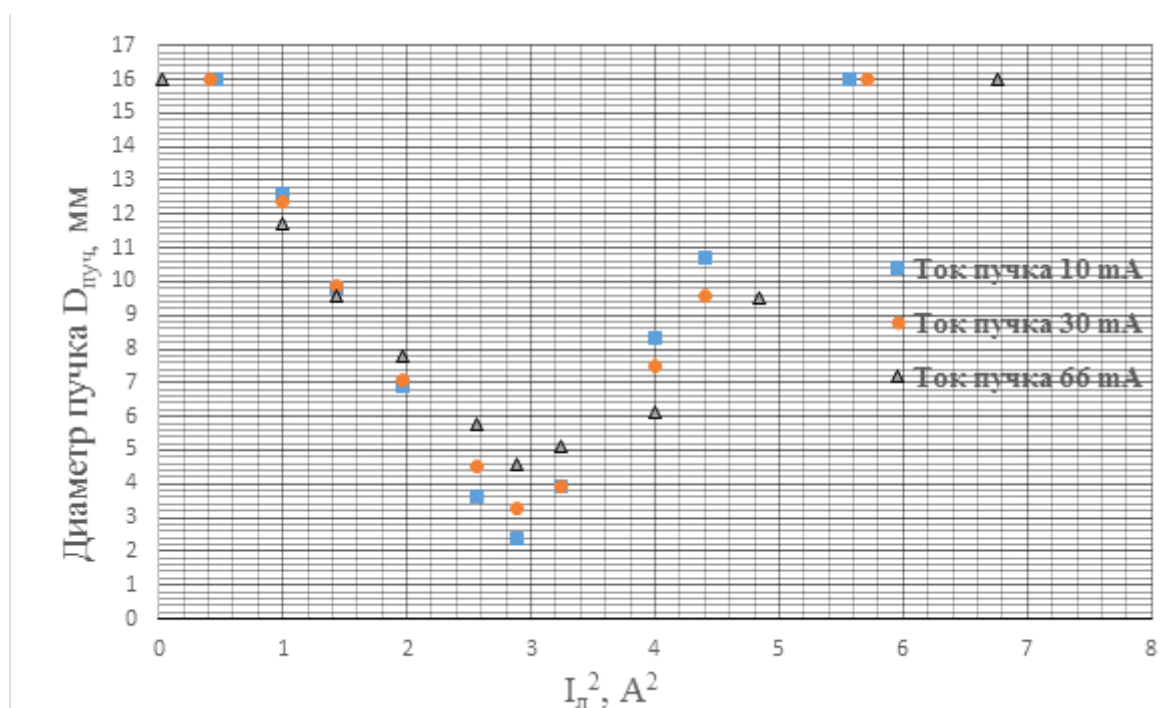


Рис. 7. Зависимость размера пучка в диафрагме от тока фокусирующей линзы при энергии 1,5 МэВ

Fig. 7. Dependence of the Beam Size in the Diaphragm on the Focusing Lens Current at 1.5 MeV Energy

Таким образом, находим зависимость размера пучка в диафрагме от фокусного расстояния линзы. Ниже описывается, как оценить диаметр пучка и его расходимость на входе в линзу, т. е. на выходе ускорительной трубки. На рис. 8 приведена простая схема, позволяющая определить d_l из зависимости $D_{пуч}$ ($1/f_l$), эквивалентной зависимости $D_{пуч}$ (I_l^2) на рис. 7.

Из рис. 8 видно, что

$$D_{пуч} = d_l - (\alpha_l - \alpha_0)L_d, \tag{1}$$

где α_0 – угол расходимости или сходимости пучка на входе в линзу; $\alpha_l = d_l/f_l$. Изменение угла α_l при прохождении линзы рассмотрим в приближении геометрической оптики.

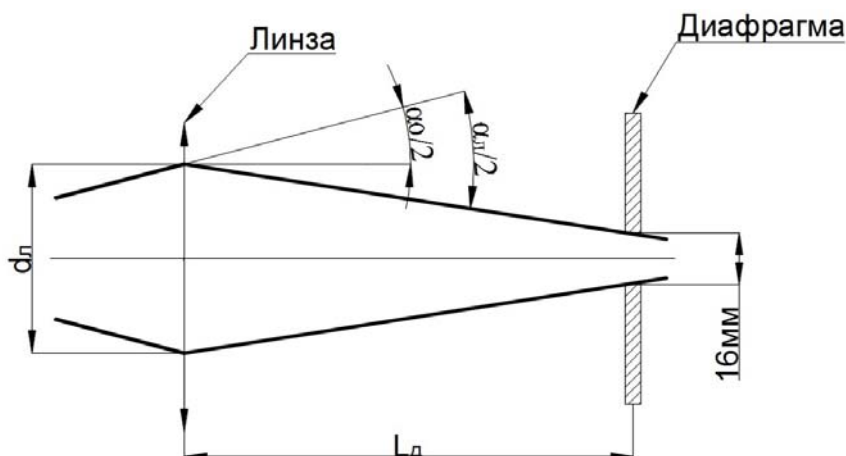


Рис. 8. Схема, позволяющая определить диаметр пучка в линзе d_l .

Д – измерительная диафрагма с диаметром отверстия 16 мм. $D_{пуч}$ – диаметр пучка в диафрагме, L_d – расстояние от линзы до диафрагмы, составляющее 940 мм

Fig. 8. Scheme to determine diameter of the beam in the lens d_l .

D – measuring diaphragm with a hole diameter of 16 mm. $D_{пуч}$ – diameter of the beam in the diaphragm, L_d – the distance from the lens to the diaphragm, which is 940 mm

Фокусное расстояние электромагнитной линзы определяли по формуле

$$f_l = \frac{4(B\rho)^2}{I_l^2 \cdot \int B_{1A}^2 \cdot dl},$$

где $(B \cdot \rho)$ – импульс электронов на выходе из ускорительной трубки, Гс·см; $\int B_{1A}^2 dl$ – интеграл напряженности магнитного поля для электромагнитной линзы, нормированный на ток линзы 1 А, т. е. при токе 1 А он был получен в результате измерения магнитного поля линзы и составляет $9,5 \cdot 10^5$ (Гс²·см) / А²; I_l – ток электромагнитной линзы, А.

Тогда

$$D_{пуч} = d_l + \alpha_0 L_d - \frac{d_l \cdot L_d \cdot I_l^2 \cdot \int B^2 \cdot dl}{4(B\rho)^2}, \tag{2}$$

так как $D_{\text{пуч}}$ линейно зависит от $I_{\text{л}}^2$, то из наклона кривой $D_{\text{пуч}}(I_{\text{л}}^2)$ можно найти $d_{\text{л}}$, взяв производную по $I_{\text{л}}^2$ от правой части формулы (2)

$$\frac{\Delta(D_{\text{пуч}})}{\Delta(I_{\text{л}}^2)} = \frac{d_{\text{л}} \cdot L_{\text{д}} \cdot \int B^2 \cdot dl}{4(B\rho)^2},$$

$$d_{\text{л}} = \frac{\Delta(D_{\text{пуч}})}{\Delta(I_{\text{л}}^2)} \cdot \frac{4(B\rho)^2}{(\int B^2 \cdot dl) \cdot L_{\text{д}}}. \quad (3)$$

По этой же кривой, как видно из (1), можно найти и расходимость пучка на входе в линзу. Для этого нужно экстраполировать левую часть кривой $D_{\text{пуч}}(I_{\text{л}}^2)$ до $D_{\text{пуч}} = 0$. Тогда из (1)

$$0 = d_{\text{л}} - \alpha_{\text{л}} L_{\text{д}} - \alpha_0 L_{\text{д}},$$

$$\alpha_0 = \frac{d_{\text{л}}}{L_{\text{д}}} - \alpha_{\text{л}} = \frac{d_{\text{л}}}{L_{\text{д}}} - \frac{d_{\text{л}}}{f_{\text{л}}} = d_{\text{л}} \cdot \frac{f_{\text{л}} - L_{\text{д}}}{L_{\text{д}} \cdot f_{\text{л}}}, \quad (4)$$

где $f_{\text{л}}$ – фокусное расстояние линзы при $I_{\text{л}}^2 (D_{\text{пуч}} = 0)$.

По другому способу, для нахождения α_0 также нужно экстраполировать кривую $D_{\text{пуч}}(I_{\text{л}}^2)$ до $I_{\text{л}}^2 = 0$, т. е. до значения при выключенной линзе. Тогда

$$D_{\text{пуч}} = d_{\text{л}} + \alpha_0 L_{\text{д}},$$

$$\alpha_0 = \frac{D_{\text{пуч}} - d_{\text{л}}}{L_{\text{д}}}. \quad (5)$$

Приведем параметры пучка, полученные из рис. 6.

Наклон кривой $D_{\text{пуч}}(I_{\text{л}}^2)$

$$\frac{\Delta(D_{\text{пуч}})}{\Delta(I_{\text{л}}^2)} = \frac{17}{3,5}.$$

Для энергии 1,5 МэВ $(B\rho) = 6,5 \cdot 10^3$ Гс·см.

Подставляя это значение в формулу (3), получаем $d_{\text{л}} = 9$ мм для тока пучка 66 мА, а угол α_0 из формулы (5) будет составлять $7 \cdot 10^{-3}$ рад. Если воспользоваться формулой (4), то для α_0 получим угол расходимости $9 \cdot 10^{-3}$ рад.

Параметры пучка при меньших токах отличаются несущественно.

Основные результаты

На основании проведенных измерений осенью 2018 г. было спроектировано и изготовлено устройство для выпуска в атмосферу сфокусированного электронного пучка из ускорителя ЭЛВ, имеющего трубку с относительно большой апертурой, равной 100 мм. Для быстрого испытания выпускного устройства с минимальными финансовыми затратами было решено внедрить его на действующий ускоритель ЭЛВ-6 с ускорительной трубкой с магнитным сопровождением. Общий вид выпускного устройства показан на рис. 9. В ходе испытаний была достигнута устойчивая работа на мощности пучка 70 кВт и кратковременная на 100 кВт. После длительной работы ускорителя на мощности 50 кВт диаметры отверстий в диафрагме не изменились. Диаметр отверстия диафрагмы на выходе из выпускного устройства составил 2–2,5 мм.

Основываясь на полученных данных, для работы нового выпускного устройства с серийной ускорительной трубкой (т. е. ускорительной трубкой с большой апертурой) мы выбрали оптическую схему, показанную на рис. 10. Линза $L1$ находится непосредственно на нижнем конце ускорительной трубки. Пройдя линзу $L1$, пучок фокусируется вблизи диафрагмы D_6

и, разойдясь до диаметра ≤ 10 мм, проходит через диафрагму D_5 . Эта диафрагма представляет трубку диаметром 10 мм и длиной 200 мм. В промежутке между каждой из диафрагм имеется вакуумная откачка. Для проводки пучка по оси диафрагм имеются катушки коррекции C_1, C_2, C_3 .

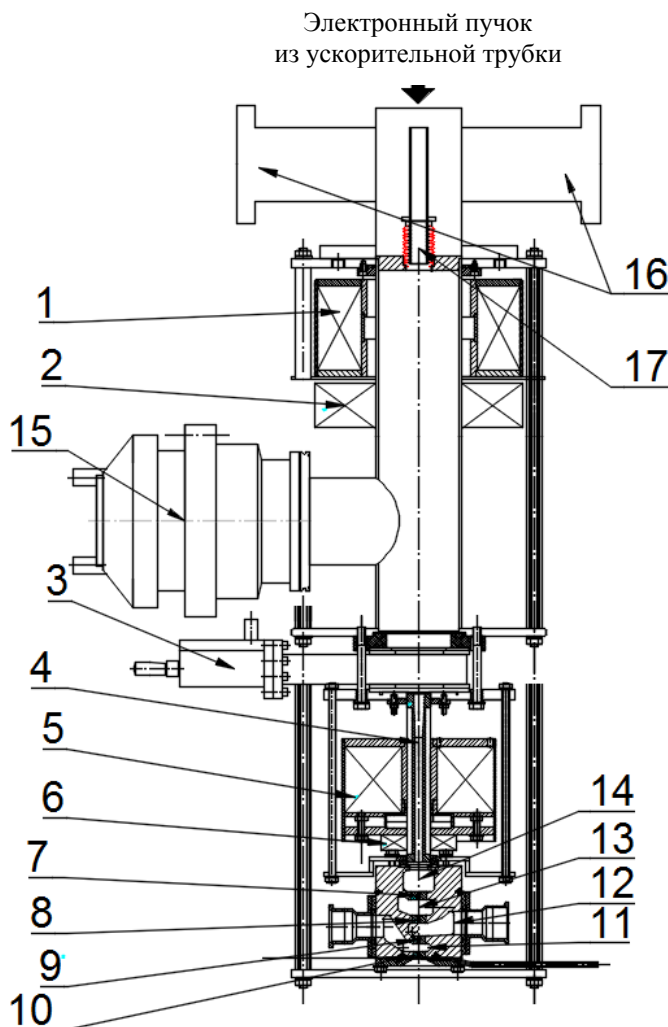


Рис. 9. Выпускное устройство: 1 – верхняя линза; 2 – верхние корректоры положения пучка; 3 – шибер; 4 – водоохлаждаемая диафрагма с диаметром отверстия 10 мм; 5 – нижняя линза; 6 – нижние корректора; 7 – диафрагма с отверстием диаметром 4 мм; 8 – диафрагма с отверстием диаметром 3,5 мм; 9 – диафрагма с отверстием диаметром 2,5 мм; 10 – диафрагма с отверстием диаметром 2 мм; 11 – первая ступень откачки (насос АВЗ-90); 12 – вторая ступень откачки (насос АВЗ-90); 13 – третья ступень (бустерный паромасляный насос 2НВБМ-250); 14 – четвертая ступень (турбомолекулярный насос НВТ-450); 15 – пятая ступень (турбомолекулярный насос НВТ-450); 16 – шестая ступень (два насоса НМД-0,4); 17 – вакуумное сопротивление 2 л/с

Fig. 9. Extraction Device: 1 – upper lens; 2 – upper correctors of the beam position; 3 – gate valve; 4 – water cooled diaphragm with a hole diameter of 10 mm; 5 – lower lens; 6 – lower correctors of the beam position; 7 – diaphragm with a hole diameter of 4 mm; 8 – diaphragm with a hole diameter of 3.5 mm; 9 – diaphragm with a hole diameter of 2.5 mm; 10 – diaphragm with a hole diameter of 2 mm; 11 – the first stage of pumping (pump AVZ-90); 12 – the second stage of pumping (pump AVZ-90); 13 – the third stage (booster steam-oil pump 2NVBM-250); 14 – the fourth stage (turbomolecular pump NVT-450); 15 – the fifth stage (turbomolecular pump NVT-450); 16 – the sixth stage (two ions pumps NMD-0,4); 17 – vacuum resistance 2 l/s

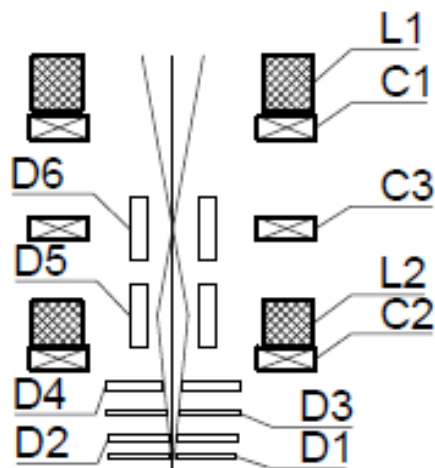


Рис. 10. Оптическая схема выпускного устройства: D1 – диафрагма с отверстием диаметром 2 мм; D2 – диафрагма с отверстием диаметром 2.5 мм; D3 – диафрагма с отверстием диаметром 3.5 мм; D4 – диафрагма с отверстием диаметром 4 мм; D5 – водоохлаждаемая диафрагма с отверстием диаметром 10 мм; D6 – водоохлаждаемая диафрагма с отверстием диаметром 7 мм; C1, C2, C3 – катушки коррекции; L1, L2 – фокусирующие электромагнитные линзы

Fig. 10. Optical scheme of the extraction device: D1 – diaphragm with a hole diameter of 2 mm; D2 – diaphragm with a hole diameter of 2.5 mm; D3 – diaphragm with a hole diameter of 3.5 mm; D4 – diaphragm with a hole diameter of 4 mm; D5 – water-cooled diaphragm with a hole diameter of 10 mm; D6 – water-cooled diaphragm with a hole diameter of 7 mm; C1, C2, C3 – correction coils; L1, L2 – focusing electromagnetic lenses

В настоящее время на установке с модернизированным устройством для выпуска сфокусированного электронного пучка выполняются различные эксперименты по получению нанопорошков, наплавке порошковых материалов на металлы и др.

Список литературы / References

1. **Zimek Z., Salimov R. A.** Windowless output for high power-low energy electron accelerators. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C: Radiation Physics and Chemistry*, 1992, vol. 40, no. 4, p. 317–320.
2. **Salimov R. A., Cherepkov V. G., Golubenko J. I., Krainov G. S., Korabelnikov B. M., Kuznetsov S. A., Kuksanov N. K., Malinin A. B., Nemytov P. I., Petrov S. E., Prudnikov V. V., Fadeev S. N., Veis M. E.** D.C. high power electron accelerators of ELV-series: status, development, applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 2000, no. 57, p. 661–665.
3. **Салимов Р. А.** Мощные ускорители электронов для промышленного применения // УФН. 2000. Т. 170, № 2 С. 197–201.
Salimov R. A. Powerful electron accelerators for industrial use. *Physics-Uspeski*, 2000, vol. 170, no. 2, p. 197–201. (in Russ.)
4. **Куксанов Н. К., Салимов Р. А., Черепков В. Г.** Ускорительная трубка. Препринт ИЯФ 79-45. Новосибирск, 1979.
Kuksanov N. K., Salimov R. A., Cherepkov V. G. Accelerator tube. Preprint BINP 79-45. Novosibirsk, 1979. (in Russ.)
5. **Tiunov M. A.** BEAM. 2D Code Package for Simulation of High Perveance Beam Dynamics in Long Systems. In: Proc. of the International Symposium SCHEF.99. Dubna, 1999, p. 202–208.

Материал поступил в редколлегию
Received
13.03.2019

Сведения об авторах / Information about the Authors

Домаров Евгений Вадимович, инженер-исследователь, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Evgeniy V. Domarov, Engineer-Research, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

domarov88@mail.ru

Воробьев Денис Сергеевич, ведущий инженер, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Denis S. Vorobyov, lead-Engineer, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

djdenson@mail.ru

Голковский Михаил Гедалиевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Mikhail G. Golkovsky, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

golkovski@mail.ru

Голубенко Юрий Иванович, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Yuriy I. Golubenko, Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

golubenk@inp.nsk.su

Корчагин Алексей Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Aleksey I. Korchagin, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

aikorchagin@mail.ru

Куксанов Николай Константинович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Nikolay K. Kuksanov, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

kuksanov@inp.nsk.su

Лаврухин Александр Владимирович, ведущий инженер, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Aleksandr V. Lavrukhin, Lead Engineer, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

a.v.lav@mail.ru

Немытов Петр Иванович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Petr I. Nemytov, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
nemytov@inp.nsk.su

Салимов Рустам Абельевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Rustam A. Salimov, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
rsalimov41@mail.ru

Семенов Алексей Вячеславович, научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Aleksey V. Semenov, Research Assistant, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
A.V.Semenov@inp.nsk.su

Сорокин Анатолий Васильевич, инженер – конструктор 1 категории НКО, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Anatoliy V. Sorokin, Design Engineer of the 1st Category, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
anvaso@yandex.ru

Фадеев Сергей Николаевич, кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Sergey N. Fadeev, Candidate of Technical Sciences, Head of the Research Laboratory, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
S.N.Fadeev@inp.nsk.su

Чакин Иван Константинович, инженер-исследователь, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Ivan K. Chakin, Engineer-Research, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
chak_in2003@bk.ru

Черепков Виктор Григорьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия)

Viktor G. Cherepkov, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
V.G.Cherepkov@inp.nsk.su