

МЕДЛЕННЫЙ ВЫВОД ПУЧКА ЯДЕР УГЛЕРОДА ИЗ СИНХРОТРОНА У-70

© 2021 г. Ю. М. Антипов^а, Г. И. Бритвич^а, С. В. Иванов^а, В. А. Калинин^{а,*},
О. П. Лебедев^а, Э. А. Людмирский^а, А. В. Максимов^а, А. В. Минченко^а,
А. П. Солдатов^а, Г. В. Хитев^а

^а Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра
“Курчатовский институт”

Россия, 142281, Протвино Московской обл., пл. Науки, 1

*e-mail: vakalinin@ihep.ru

Поступила в редакцию 09.07.2020 г.

После доработки 02.10.2020 г.

Принята к публикации 21.10.2020 г.

Представлена система медленного вывода пучка из синхротрона У-70 НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ (Протвино). Система находится в эксплуатации с 2013 года и используется для вывода пучка ядер углерода промежуточной энергии (455 МэВ/нуклон) для прикладных радиобиологических исследований. Рассмотрены вопросы динамики пучка и инженерной реализации этой системы. Приводятся экспериментальные результаты, полученные на У-70 и подтверждающие достижение проектных параметров.

DOI: 10.31857/S0032816221020117

1. ВВЕДЕНИЕ

В 2011 году в Ускорительном комплексе (протонов) У-70 НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ было успешно освоено ускорение пучков ядер углерода. Углеродные пучки высокой энергии (до 25–35 ГэВ/нуклон) предназначены для экспериментальных исследований по ядерной физике и физике элементарных частиц. Пучки ядер углерода с удельной кинетической энергией до 455 МэВ/нуклон используются для прикладных радиобиологических исследований.

Энергия пучка, равная 455 МэВ/нуклон, достигается в результате ускорения ядер углерода в быстром синхротроне У-1.5 – инжекторе (бустере) большого синхротрона У-70.

В ходе подготовки программы прикладных исследований с помощью пучков ядер углерода промежуточной энергии возникло предложение об использовании кольца синхротрона У-70 при постоянном ведущем магнитном поле в режиме накопителя и растяжителя ионного пучка, в котором кольцевой электромагнит У-70 питается от обособленного маломощного (<30 кВт) источника тока. Этот режим позволяет обеспечить транспортировку (на расстояние около 350 м) и медленный вывод (длительность до 1 с) пучка в экспериментальный зал 1 БВ.

Ключевой технологической системой для реализации такого режима является новая система

медленного вывода пучка, которую необходимо было создать в условиях ограничений уже действующей установки без сопутствующего деструктивного влияния на стандартные протонные режимы У-70.

В данной статье излагаются результаты работ над системой медленного вывода пучка промежуточной энергии из У-70. Приводятся данные экспериментальных измерений на пучке, подтверждающие достоверность расчетных методик и работоспособность использованных технических решений.

Система находится в штатной эксплуатации с 2013 года.

2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Рассматривается система медленного вывода пучка ядер углерода из ускорителя У-70 на нижнем плате магнитного поля. Применяется классическая двухкаскадная схема Piccioni–Wright [1, 2]. Она использует тонкую внутреннюю мишень-замедлитель (далее ВМ) и отклоняющий магнит с тонкой перегородкой (септумом), так называемый септум-магнит (СМ), которые разнесены по фазе ψ бетатронного движения на π .

Подобная схема ранее успешно применялась для вывода протонного пучка в слабофокусирующем протонном синхротроне COSMOTRON [3] (BNL, США, 1953–1966 гг.). Она оказалась при-

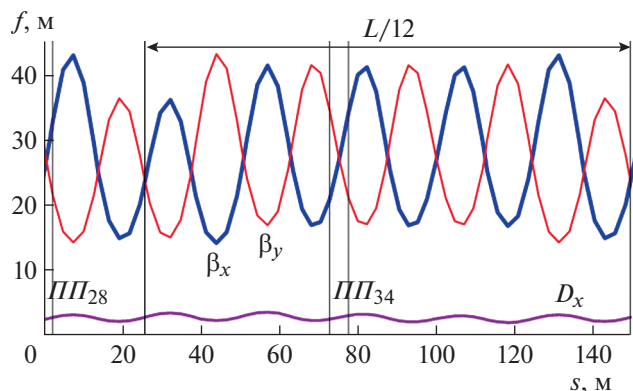


Рис. 1. Оптические функции У-70 на участке вывода.

влекательной для вывода углеродного пучка промежуточной энергии из сильнофокусирующего синхротрона У-70 по двум причинам.

С одной стороны, смещенная с центральной орбиты выводимая фракция пучка локализована лишь на $1/20$ длины орбиты У-70 без многооборотного циклического движения по кольцу. Это минимизирует потери выводимого пучка на ограничениях апертуры вакуумной камеры У-70.

С другой стороны, в сравнении с ускоренными протонами пучок ядер углерода при пересечении мишени-замедлителя имеет увеличенные ионизационные потери энергии (это рабочий механизм схемы вывода) и меньший угол сопутствующего многократного кулоновского рассеяния (м.к.р.) в веществе мишени (деструктивный фактор). В результате достигаются высокие (вблизи 75–80%) коэффициенты пропускания тока выводимого пучка по трассе *ВМ–СМ* (так называемая эффективность вывода). Эти же особенности взаимодействия углеродного пучка с веществом делают его привлекательным для ионной лучевой терапии – одной из планируемых областей применения медленно выведенного углеродного пучка У-70.

Схема вывода поясняется с помощью конкретного набора числовых параметров, соответствующего рабочей конфигурации У-70.

3. МАГНИТНАЯ ОПТИКА КОЛЬЦА У-70

Графики оптических функций (функций Твисса) магнитной структуры синхротрона У-70 приведены на рис. 1, где β_x , β_y – горизонтальная и вертикальная амплитудные функции, D_x – горизонтальная дисперсионная функция. Рассмотрен участок от прямолинейного промежутка $ПП_{28}$ до $ПП_{40}$ (оба включительно). Вертикальные линии указывают на границы промежутков $ПП_{28}$ (длина 2.55 м) и $ПП_{34}$ (4.79 м). Оборудование и трассы пучка на участке магнитной структуры от $ПП_{28}$ до $ПП_{34}$ используются при выводе.

Экстремумы β -функций достигаются в магнитных блоках с совмещенными функциями поворота и фокусировки. Номер магнита совпадает с номером предшествующего ему (по ходу пучка) прямолинейного промежутка $ПП$. Магниты с четными номерами являются фокусирующими, а с нечетными – дефокусирующими в горизонтальном направлении.

Начало отсчета продольной координаты s и бетатронной фазы ψ совмещено с началом $ПП_{28}$. Протяженность показанного на рис. 1 участка магнитной структуры составляет $1/10$ длины орбиты У-70, $L = 1483.70$ м. Горизонтальная размерная линия отмечает один (четвертый из 12) стандартный суперпериод магнитной структуры У-70, имеющий протяженность $L/12 = 123.64$ м (между серединами промежутков $ПП_{30}$ и $ПП_{40}$).

Тонкая внутренняя мишень-замедлитель *ВМ* системы вывода размещается в начале промежутка $ПП_{28}$ ($s = 0$) на внешней стороне орбиты. Магнит *СМ* расположен в первой по ходу пучка половине $ПП_{34}$ с внутренней стороны орбиты. Выведенная фракция пучка покидает кольцо У-70 в $ПП_{34}$. Направление – внутрь орбиты.

Бетатронные частоты (рабочая точка) ускорителя, соответствующие оптике рис. 1:

$$Q_x = 9.768, \quad Q_y = 9.696. \quad (1)$$

Опорной координатой для определения положения и геометрических размеров апертуры *СМ* является точка, в которой набег фазы ψ бетатронных колебаний относительно *ВМ* равен π .

Значения оптических функций кольца У-70 в этой точке и в начале отсчета s , $\psi = 0$ (*ВМ*) приведены в табл. 1, где $\alpha = -1/2d\beta/ds$ – одна из функ-

Таблица 1. Оптические функции опорных точек трассы вывода

Направление	Обозначение	ψ	s , м	s относительно начала $ПП_{34}$, м	β , м	α	D , м	dD/ds
x	(o)	0	0	0.0	23.78	-1.55	2.30	0.15
	(i)	π	73.96	0.90	23.02	-1.22	2.52	0.12
y	(o)	0	0	0.0	30.18	1.92	0	0
	(i)	π	74.46	1.40	30.01	1.50	0	0

ций Твисса (α , β и γ). Искомый фазовый набег приходится на первые 0.2–0.3 промежутка $ПП_{34}$ (длина 4.79 м), где размещен магнит $СМ$.

Матрица преобразования бетатронных координат между точками $\psi = 0$ и π имеет вид [4, с. 49]:

$$\begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}_{0 \rightarrow \pi} = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{\beta(\pi)}}{\sqrt{\beta(0)}} & 0 \\ \frac{\alpha(\pi) - \alpha(0)}{\sqrt{\beta(\pi)\beta(0)}} & -\frac{\sqrt{\beta(0)}}{\sqrt{\beta(\pi)}} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Здесь индекс направления x , y для краткости опущен, а фаза ψ используется в качестве независимой переменной. Для данных из табл. 1 матрицы преобразования (2) составят

$$\begin{pmatrix} -0.984 & 0 \\ 0.014 \text{ м}^{-1} & -1.016 \end{pmatrix}_x, \quad \begin{pmatrix} -0.997 & 0 \\ -0.014 \text{ м}^{-1} & -1.003 \end{pmatrix}_y. \quad (3)$$

Линейные преобразования (2), (3) незначительно отличаются от минус единичного и обладают небольшой остаточной оптической силой $M_{21} \neq 0$. Благодаря $M_{12} = 0$ расходящиеся пучки траекторий с вершиной в плоскости $\psi = 0$ будут сфокусированы в плоскости $\psi = \pi$. По этой причине плоскость $\psi = 0$ также называется плоскостью объектов (предметов) o , а плоскость $\psi = \pi$ – плоскостью изображений i . Такая терминология обусловлена физической интерпретацией рассматриваемой системы вывода как оптической схемы для формирования перевернутого ионного радиографического изображения объекта – кромки $ВМ$, просвеченной выводимым пучком, в плоскости i , оказывающейся в пределах протяженного магнита $СМ$.

Плоскости изображений горизонтального (x) и вертикального (y) направлений магнитной оптики не совпадают (разнесены на 0.5 м) – табл. 1.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЧКА, ОЖИДАЮЩЕГО ВЫВОДА

Выводится пучок ядер углерода (ионов $^{12}\text{C}^{6+}$) с отношением “заряд–масса”, равным 1/2. Удельная кинетическая энергия $T = 455.0$ МэВ/нуклон. Магнитная жесткость 6.851 Тл·м. Релятивистские факторы:

$$\beta = 0.741, \quad \gamma = 1.488. \quad (4)$$

Радиус кривизны орбиты в магнитных блоках У-70 $\rho = 194.125$ м. Поэтому пучок (4) циркулирует на (нижнем) плато магнитного поля с индукцией $B = 353 \cdot 10^{-4}$ Тл (353 Гс).

Поперечный эмиттанс ϵ определен как произведение полуосей фазового эллипса (без множителя π) по основанию распределения. Ненормализованные (геометрические) эмиттансы пучка составляют (до начала вывода)

$$\epsilon_{x0} = 25 \text{ мм} \cdot \text{мрад}, \quad \epsilon_{y0} = 15 \text{ мм} \cdot \text{мрад}. \quad (5)$$

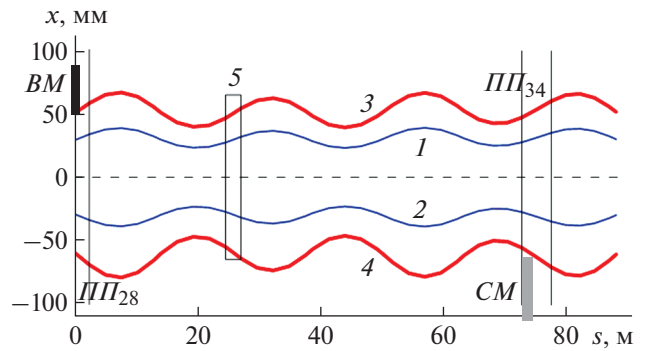


Рис. 2. Горизонтальная огибающая функция пучка.

Обозначим $u = p - p_0$ отклонение импульса p от номинального (центрального) значения p_0 . Некогерентный разброс по импульсам в пучке по основанию распределения $|u| \leq \delta p$, где

$$\delta p/p_0 = 0.2\%. \quad (6)$$

Таким образом, полный размер пучка по импульсу составляет $2\delta p$.

Далее всюду рассматривается азимутально-однородный (не сгруппированный) пучок. Он более требователен к выбору параметров системы вывода и чаще востребован на практике, чем сгруппированный пучок.

Орбита (трасса, траектория), соответствующая центру некогерентного распределения пучка по импульсам ($u = 0$), именуется центральной орбитой (трассой, траекторией).

Для целей данной работы траектории выводимого пучка прослеживаются до конца $ПП_{34}$, а отклоняющее действие $СМ$ не учитывается.

Перед началом вывода горизонтальная огибающая функция циркулирующего пучка, ожидающего вывода, составляет

$$x_{1,2}(s) = \pm \left(\sqrt{\beta_x(s)} \epsilon_{x0} + D_x(s) \frac{\delta p}{p_0} \right). \quad (7)$$

Эта огибающая функция симметрична относительно центральной орбиты. График показан на рис. 2 (кривые 1, 2). Мишень $ВМ$ размещается вне этой огибающей на координате

$$x_{ВМ} = +50 \text{ мм}. \quad (8)$$

Происхождение кривых 3, 4 и 5 поясняется далее в комментариях к рис. 3 и уравнению (9).

На практике величина (8) указывает на расстояние между кромкой $ВМ$ и центром циркулирующего пучка. В У-70 оно может изменяться с помощью локального горизонтального искажения замкнутой орбиты между 24-м и 30-м магнитными блоками – так называемого полуволнового бампа 24/30.

Возможны два способа наведения пучка на $ВМ$ при его выводе из У-70:

– с помощью нарастающего во времени бампа 24/30 (поступательное наведение);

– с помощью контролируемой шумовой раскачки амплитуды a_x горизонтальных бетатронных колебаний (диффузионное наведение) и стационарного бампа 24/30, включенного в режиме так называемой “подставки”.

Первый вариант относительно прост в технической реализации. Он применялся на начальном этапе пусконаладки системы, но не смог обеспечить приемлемое качество медленного вывода.

Второй вариант оказывается более привлекательным для вывода в прикладных целях (радиобиология, лучевая терапия). Им обеспечены квазистационарные режимы работы магнитной оптики, отсутствие эффекта вариации по времени (“пробежки”) среднего импульса частиц выводимой фракции, быстрая отсечка и включение вывода по внешней команде, малые пульсации выведенного тока и др. [5, 6]. Поэтому в данной статье рассматривается только второй вариант.

На рис. 3 показаны фазовые эллипсы (эллипсы Флоке) для частиц с импульсами $\pm \delta p/p_0$ на границе бетатронного распределения до начала бетатронной раскачки (кривые 1, 2) и в момент касания BM , но еще до взаимодействия с мишенью (кривые 3, 4). Движение вдоль фазовой траектории идет по ходу часовой стрелки.

При бетатронном (шумовом) наведении пучка на BM в момент касания мишени амплитуда горизонтальных колебаний частиц с импульсом $-\delta p/p_0$ должна превысить амплитуду колебаний частиц с $+\delta p/p_0$ на величину, равную $2D_x(0)(\delta p/p_0)$. Поэтому огибающая функция ожидающего вывод пучка оказывается несимметричной относительно центральной орбиты:

$$x_{3,4}(s) = \pm \left[x_{BM} \sqrt{\frac{\beta_x(s)}{\beta_x(0)}} + \left(D_x(s) \mp D_x(0) \sqrt{\frac{\beta_x(s)}{\beta_x(0)}} \right) \frac{\delta p}{p_0} \right]. \quad (9)$$

Отсюда следует, что внутренний полуразмер пучка превышает внешний:

$$|x_4(s)| - |x_3(s)| = 2D_x(0) \frac{\delta p}{p_0} \sqrt{\frac{\beta_x(s)}{\beta_x(0)}}. \quad (10)$$

Графики функций (9) показаны на рис. 2 (кривые 3, 4). Граница пучка остается внутри горизонтальной апертуры регулярной части камеры У-70, равной ± 100 мм. В промежутке $ПП_{30}$ камера имеет сужение $\varnothing 130$ мм, схематически представленное прямоугольником 5 на рис. 2, не препятствующее прохождению частиц.

Кромка перегородки магнита SM находится ниже координат -55.9 мм (начало $ПП_{34}$) и -63.3 мм (середина $ПП_{34}$). Подведение пучка к перегородке SM осуществляется полуволновым бампом 32/38 в режиме “подставки”.

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫВОДИМОГО ПУЧКА

5.1. Внутренняя мишень

Выводимая частица однократно пересекает тонкую мишень BM и испытывает ионизационные потери энергии. При этом ее импульс скачком уменьшается на относительную величину

$$\Delta p/p_0 = 0.69\%. \quad (11)$$

В терминах уменьшения (сброса) удельной кинетической энергии это

$$\Delta T = \beta^2 \gamma E_{0aem} \frac{\Delta p}{p_0} = 5.21 \text{ МэВ/нуклон} \quad (12)$$

или 62.5 МэВ на ядро ^{12}C , где $E_{0aem} = 931.5$ МэВ – энергия покоя одного нуклона в ядре.

Выбор указанных значений $\Delta p/p_0$ и ΔT диктуется условием достаточного горизонтального разведения циркулирующего и выводимого пучков, определенным далее в виде неравенства (22).

Сброс импульса (11) и энергии (12) выводимых частиц происходит в бериллиевой мишени с толщиной

$$d = 4.0 \text{ мм}. \quad (13)$$

Среднеквадратичный угол σ_Θ сопутствующего м.к.р. в веществе мишени составит (проекция пространственного угла на плоскость движения)

$$\sigma_\Theta = 0.95 \text{ мрад}. \quad (14)$$

Параметры внутренней мишени для пучка ядер углерода с энергией 455 МэВ/нуклон (при расчете эффектов взаимодействия пучка с веществом использовался обзор [7, раздел 33]):

Материал мишени	Be (бериллий)
Плотность ρ	1.848 г/см ³
Толщина мишени d	4.0 мм
Высота мишени h	10.0 мм
Приведенный импульс пучка $\beta\gamma$	1.10
Удельные ионизационные потери для частицы с единичным зарядом	2.35 МэВ/(г/см ²)
Удельные ионизационные потери ядра ^{12}C	84.6 МэВ/(г/см ²)
Линейные ионизационные потери ядра ^{12}C	15.5 МэВ/мм
Сброс энергии ядра ^{12}C в мишени	62.5 МэВ
Сброс относительного импульса в мишени $\Delta p/p_0$	0.0069
Радиационная длина	353 мм
Среднеквадратичный угол рассеяния σ_Θ	0.95 мрад

5.2. Горизонтальное направление

После пересечения тонкой мишени выводимая частица получает новую равновесную орбиту (она смещена внутрь кольца), случайное угловое отклонение и попадает на новые фазовые траектории на плоскости $(x; dx/ds)$. Ее динамика на участке вывода $BM-CM$ описывается матричным уравнением

$$\begin{pmatrix} x - D_x \frac{u - \Delta p}{p_0} \\ \frac{dx}{ds} - \frac{dD_x}{ds} \frac{u - \Delta p}{p_0} \end{pmatrix}_{s \geq s_{BM}} = \quad (15)$$

$$= \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{pmatrix}_{s_{BM} \rightarrow s} \begin{pmatrix} x - D_x \frac{u - \Delta p}{p_0} \\ \frac{dx}{ds} - \frac{dD_x}{ds} \frac{u - \Delta p}{p_0} + \Theta \end{pmatrix}_{s_{BM}},$$

$$u = p - p_0, \quad |u| \leq \delta p, \quad |\Theta| \leq 2\sigma_\Theta, \quad (16)$$

где X_{ij} – матрица преобразования горизонтальных бетатронных координат на отрезке $[s_{BM}; s]$, $\Theta = \Delta(dx/ds)$ – изменение угла (излом) траектории частицы в мишени из-за м.к.р. (здесь и далее учитывается по уровню $\pm 2\sigma_\Theta$).

Протяженный магнит CM являются 1-м (по ходу пучка) магнитооптическим элементом канала транспортировки выведенного пучка. Плоскость изображений i (табл. 1) находится в его пределах. Из уравнений (2) и (15) легко определить координатную и угловую дисперсию преобразования $o \rightarrow i$

$$d_x(\pi) = D_x(\pi) + D_x(0) \sqrt{\frac{\beta_x(\pi)}{\beta_x(0)}}, \quad (17)$$

$$\frac{d}{ds} d_x(\pi) = \frac{dD_x(\pi)}{ds} - D_x(0) \frac{\alpha_x(\pi)}{\sqrt{\beta_x(\pi)\beta_x(0)}}. \quad (18)$$

Координата и наклон центральной ($u = -\Delta p/p_0$) траектории выводимой фракции пучка в плоскости изображений i зависят от координаты мишени (8) и величины сброса импульса (11) в ней:

$$x_0(\pi) = -x_{BM} \sqrt{\frac{\beta_x(\pi)}{\beta_x(0)}} - d_x(\pi) \frac{\Delta p}{p_0}, \quad (19)$$

$$\frac{dx_0(\pi)}{ds} = x_{BM} \frac{\alpha_x(\pi)}{\sqrt{\beta_x(\pi)\beta_x(0)}} - \frac{d}{ds} d_x(\pi) \frac{\Delta p}{p_0}. \quad (20)$$

Ниже приведены числовые значения величин (17)–(20) для У-70 – характеристики траекторий в плоскости изображений:

d_x , м	$d/ds d_x$	x_0 , мм	$d/ds x_0$, мрад
4.78	0.24	-81.9	-4.21

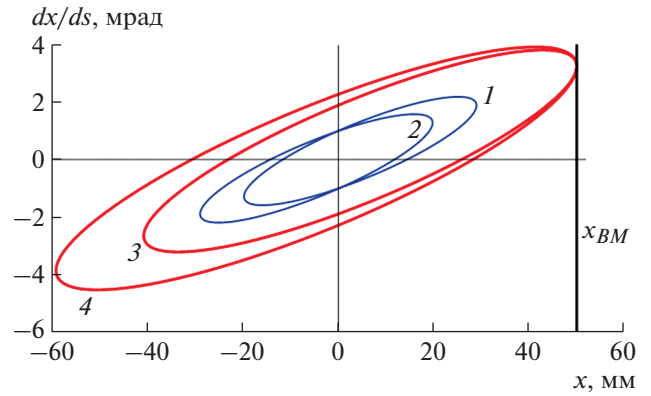


Рис. 3. Горизонтальные фазовые эллипсы до взаимодействия с мишенью BM .

Необходимым условием для координатного разведения циркулирующего и выводимого пучков является неравенство

$$x_0(\pi) + d_x(\pi) \frac{\delta p}{p_0} + \Delta x_1 \leq x_4(\pi), \quad (21)$$

где Δx_1 – размер пустого места, резервируемого для размещения перегородки магнита CM ; x_4 – координата внутренней кромки циркулирующего пучка (9). Отсюда можно оценить требуемый сброс импульса частицы в BM :

$$\frac{\Delta p}{p_0} \geq \frac{2\delta p}{p_0} + \frac{\Delta x_1}{d_x(\pi)}. \quad (22)$$

В У-70 кромки пучков разведены на $\Delta x_1 = 13.9$ мм.

Горизонтальное разведение пучков можно увеличить, установив мишень BM с большей массовой толщиной ($г/см^2$). Однако при этом из-за эффекта м.к.р. быстро возрастают потери пучка в вертикальном направлении (см. в разделе 6). Такое техническое решение уменьшает эффективность вывода.

Горизонтальные проекции типичных траекторий вывода для частиц, находящихся на границе основания функции распределения (16), – импульсов $\pm \delta p/p_0$ и углов рассеяния $\Theta = \pm 2\sigma_\Theta$ (знаки выбираются независимо) – построены на рис. 4 (кривые 1–4). Там же показана центральная траектория выводимого пучка (кривая 0) и огибающая функция циркулирующего пучка при бетатронном шумовом наведении (9) (периодические кривые 5, 6). Спецификация параметров кривых 0–4 для удобства представлена в виде табл. 2.

Горизонтальные размеры регулярной части вакуумной камеры составляют ± 100 мм (штриховые линии на рис. 4). Апертурные ограничения достигаются на внутренней стенке вакуумной камеры в 32-м (фокусирующем) магнитном блоке. Однако эти потери пучка оказываются приемлемыми, поскольку при выводе происходит лишь

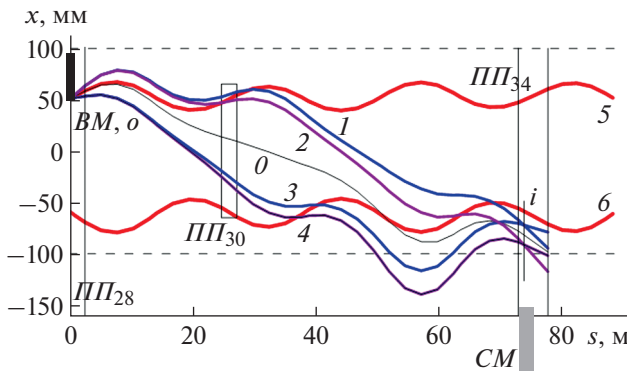


Рис. 4. Горизонтальные трассы пучка при выводе.

однократное отсечение периферийного сегмента функции распределения пучка. Оно не переходит в более обременительную коллимацию кольцевых слоев распределения частиц, характерную для циклического движения пучка вблизи апертурного ограничения.

Для полного устранения горизонтальных потерь частиц на отрезке трассы вывода с координатами $|x| > 100$ мм требуется установка участка вакуумной камеры, расширенного до -150 мм внутрь кольца. Этот участок должен быть размещен в 32-м магнитном блоке. Указанное требование не является усложнением, присущим только рассматриваемой здесь схеме вывода. Подобная расширенная камера уже установлена в 24-м магнитном блоке У-70 для обеспечения беспрепятственного прохождения частиц, выводимых с помощью других штатных систем вывода пучка из У-70.

Угловой размер (расходимость) выводимой фракции пучка определяется эффектом м.к.р. в веществе мишени (14). Линейный размер выводимого пучка Δx_2 совпадает с величиной заброса пучка за кромку *ВМ*. В работе [5] показано, что при бетатронной шумовой раскачке пучка $\Delta x_2 \propto (Th)^{-2/5}$, где T – длительность вывода, h – высота *ВМ*. Для системы вывода пучка из У-70 $\Delta x_2 = 0.7-0.8$ мм. Поэтому несогласованный горизонтальный эмиттанс выводимого пучка не зависит от фазового объема исходного пучка и составляет

$$\delta\epsilon_x \cong \frac{1}{\pi} \Delta x_2 4\sigma_\Theta. \quad (23)$$

Отсюда $\delta\epsilon_x \leq 1.0$ мм · мрад.

Таблица 2. Параметры трасс частиц на рис. 4

#	1	2	0	3	4
Θ	$+2\sigma_\Theta$	$+2\sigma_\Theta$	0	$-2\sigma_\Theta$	$-2\sigma_\Theta$
u	$+\delta p_0$	$-\delta p_0$	0	$+\delta p_0$	$-\delta p_0$

Магнитная оптика У-70 на участке вывода *ВМ–СМ* ведет себя как фокусирующий спектрометр импульсов выводимых заряженных частиц с дифференциальным разрешением (17)

$$\frac{dx}{dp/p_0} = d_x(\pi). \quad (24)$$

Поэтому горизонтальный размер пучка (по основанию распределения) в плоскости изображений i , проходящей через магнит *СМ*, составит 19–20 мм (см. рис. 4, где траектории 1, 3 и 2, 4 попарно пересекаются). Учет неполной фокусировки пучка на входе и перефокусировки на выходе из протяженного магнита *СМ* требует увеличения ширины его межполюсного зазора до $\geq 30-31$ мм.

Горизонтальный портрет выводимого пучка, формируемый в *СМ* (плоскость изображений i), является перевернутым ионным радиографическим изображением просвеченной пучком кромки мишени *ВМ* (плоскость объектов o) с шириной Δx_2 , подвергнутым импульсному спектральному анализу (24). Поэтому при $\Delta x_2 \rightarrow 0$ горизонтальный профиль пучка в *СМ* повторит функцию распределения частиц ожидающего пучка по импульсам u .

5.3. Вертикальное направление

В вертикальном направлении подавлена дисперсионная функция $D_y = dD_y/ds = 0$. Поэтому динамика частиц на участке вывода *ВМ–СМ* описывается более простым, чем (15), матричным уравнением

$$\begin{pmatrix} y \\ \frac{dy}{ds} \end{pmatrix}_{s \geq s_{BM}} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix}_{s_{BM} \rightarrow s} \begin{pmatrix} y \\ \frac{dy}{ds} + \Theta \end{pmatrix}_{s_{BM}}, \quad (25)$$

где Y_{ij} – матрица преобразования вертикальных бетатронных координат на отрезке $[s_{BM}; s]$.

Используется внутренняя мишень *ВМ* с высотой

$$h = 10.0 \text{ мм}, \quad (26)$$

размещенная симметрично относительно плоскости центральной орбиты $y = 0$.

Вертикальная апертура регулярной части вакуумной камеры У-70 составляет ± 50 мм. Она показана штриховыми линиями на рис. 5. Там же построены вертикальные проекции типичных траекторий вывода, начинающихся в крайних высотных координатах мишени $y = \pm h/2$ и еще пропускаемых через апертуру трассы вывода (кривые 1, 4 и 2, 3 соответственно). Вертикальные огибающие функции исходного циркулирующего пучка показаны кривыми 5, 6. Линия 0 указывает на центральную орбиту (медианную плоскость ускорителя).

Избыточный вертикальный фазовый объем рассеянного пучка уменьшает эффективность вывода.

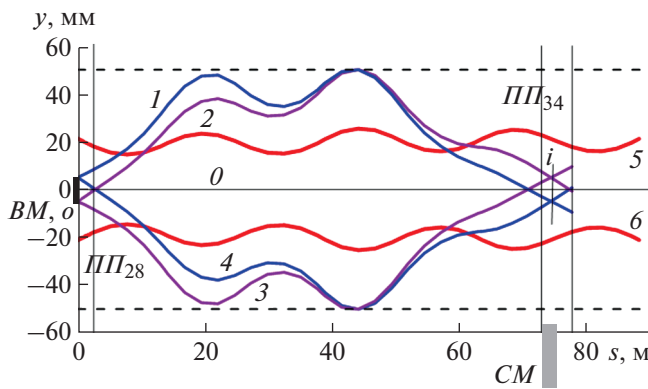


Рис. 5. Вертикальные трассы пучка при выводе.

Вертикальные ограничения для выводимой фракции со стороны меньших углов рассеяния Θ достигаются на верхней и нижней стенках вакуумной камеры в 31-м (дефокусирующем) магнитном блоке. Этого и следовало ожидать, поскольку именно в 31-м магните вертикальная β -функция У-70 принимает свое максимальное значение (42.96 м). При вполне вероятных, но редких событиях рассеяния на большие углы Θ первым перехватит гало выводимого пучка вакуумная камера 29-го магнитного блока.

В соответствии с матрицами преобразования (2), (3) траектории 1, 4 и 2, 3 на рис. 5 попарно пересекаются в границах CM . Происходит формирование перевернутого ионного радиографического изображения мишени BM (плоскость объекта o) в плоскости изображения i . Поэтому линейный размер выводимого пучка в плоскости i (рис. 5) почти совпадает высотой $BMh = 10.0$ мм. Учет неидеальной фокусировки пучка вдоль протяженного магнита CM требует увеличения высоты его межполюсного зазора до ≥ 15 мм.

Детали вертикального формирования выводимого пучка поясняются с помощью фазового портрета, показанного на рис. 6. В его центре построен эллипс Флоке B , соответствующий граничной фазовой траектории пучка с эмиттансом (5). Две прямых линии $y = \pm h/2$ указывают вертикальный образ мишени. Частицы с координатами $|y| > h/2$ находятся выше или ниже мишени и пересекут ее на следующих оборотах пучка по орбите. Эллипс A на рис. 6 соответствует вертикальному геометрическому аксептансу кольца У-70

$$A_y = 58.2 \text{ мм} \cdot \text{мрад} \quad (27)$$

Область, ограниченная параллелограммом с вершинами 1–4, показывает образ рассеянного пучка, пропускаемого по трассе вывода $BM-CM$. Вершины пронумерованы в том же порядке, что и (четыре) траектории пучка на рис. 5, стартующие из них. Участок магнитной структуры $BM-CM$

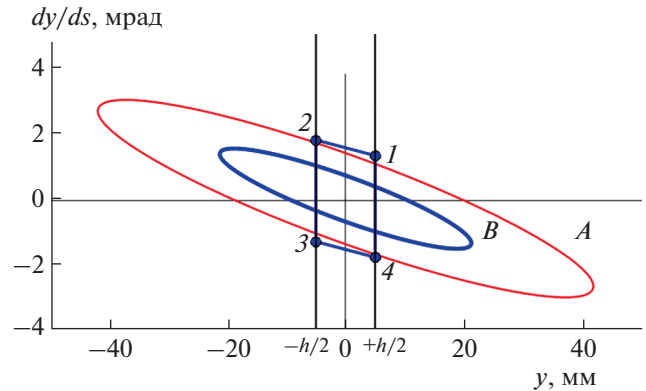


Рис. 6. Вертикальный фазовый портрет выводимого пучка на координате BM .

составляет 1/20 периметра У-70. Он достаточно “длинный” для того, чтобы его аксептанс (для однократного прохождения пучка) хорошо совпал с аксептансом всего кольца в целом (для многооборотного циклического движения) для подмножества траекторий, пересекающих BM . Однако небольшое различие между двумя аксептансами все же остается. Оно хорошо заметно на вершинах 1 и 3 параллелограмма, оказавшихся вне эллипса A .

Из-за эффекта м.к.р. происходит размытие фазового портрета выводимого пучка вдоль оси ординат. Частицы, оказавшиеся в полосе $|y| \leq h/2$ выше линии 1–2 или ниже линии 3–4, будут потеряны. Этим процессом определяется эффективность вывода.

Параллелограмм с вершинами 1–4 на рис. 6 является фазовым портретом выводимой фракции пучка. Поэтому несогласованный вертикальный эмиттанс выводимого пучка не зависит от фазового объема исходного пучка и составляет оценочно

$$\delta\epsilon_y \cong \frac{1}{\pi} h 2 \sqrt{\frac{A_y}{\beta_y(s_{BM})}} \quad (28)$$

где $\beta_y(s_{BM}) = 30.18$ м и $\delta\epsilon_y = 8.8$ мм · мрад. Поправка на уход границы изображения пропускаемого пучка с эллипса A приводит к более точной оценке в 9.9 мм · мрад.

Таким образом, высота мишени h не только задает вертикальный размер межполюсного зазора магнита CM (рис. 5). Она же определяет вертикальный эмиттанс выводимого пучка (28) и, косвенно, его горизонтальный эмиттанс (23) через зависимость $\Delta x_2 = \Delta x_2(h)$ [5]. Выбор (26) оказывается приемлемым для У-70 по трем перечисленным соображениям.

Таблица 3. Технические характеристики магнитов

Характеристики	Магнит		
	$СМ$	$ОМ_1$	$ОМ_2$
Длина по полю, мм	1250	800	800
Индукция магнитного поля, Тл	0.44	0.94	1.20
Угол поворота пучка, мрад	80	110	140
Угол поворота пучка, °	4.6	6.3	8.0
Апертура (гор. × верт.), мм	80 × 42	75 × 42	110 × 50
Толщина перегородки, мм	6.3	24.0	–

6. ОБОРУДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЫВОДА

К оборудованию системы вывода пучка относятся обсуждавшийся ранее септум-магнит $СМ$ и два следующих за ним отклоняющих магнита $ОМ_1$ и $ОМ_2$. Эти магнитооптические элементы позволяют обойти внешние габаритные ограничения штатного оборудования У-70, расположен-

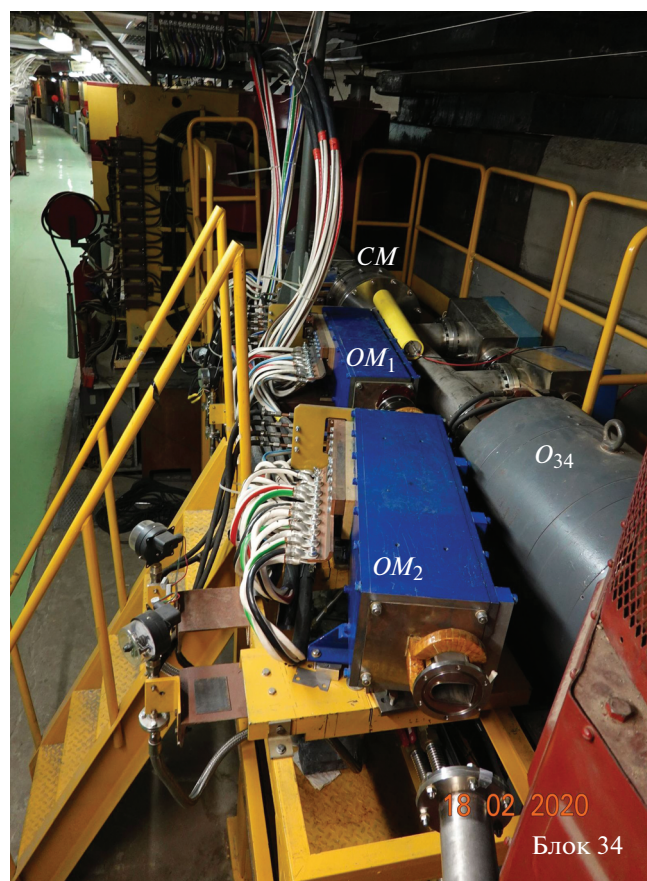


Рис. 7. Магниты $СМ$, $ОМ_1$ и $ОМ_2$. Вид против хода пучка со стороны выходного окна $ОМ_2$. Справа видны линза $О_{34}$ и ограждение обмотки 34-го магнитного блока У-70.

ного вблизи трассы вывода в прямолинейном промежутке $ПП_{34}$ (октупольная линза $О_{34}$ и 34-й магнитный блок). Технические характеристики магнитов приведены в табл. 3, а их внешний вид показан на рис. 7.

Шумовая раскачка горизонтальных бетатронных колебаний при выводе осуществляется с помощью электростатического дефлектора, расположенного в промежутке $ПП_2$. Подробное описание процесса шумовой диффузии пучка изложено в [5].

7. ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ПУЧКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ

Оборудование системы медленного вывода было изготовлено и установлено на орбите У-70 в конце 2010 года. С 2011 года начались регулярные сеансы с ускорением и выводом углеродного пучка в экспериментальный зал 1 БВ. Подтверждено соответствие системы медленного вывода проектным параметрам.

На рис. 8 показан поперечный профиль выведенного углеродного пучка, зарегистрированный с помощью радиохроматографической пленки ЕВТ-3 на выходе из магнита $СМ$. Размер профиля по основанию примерно 40×15 мм (горизонтальный × вертикальный). Исходный пучок в У-70 азимутально однородный. Интенсивность вывода $(3-6) \cdot 10^9$ ядер в цикле (8 с).

Экспериментальные временные осциллограммы медленного вывода приведены на рис. 9. На первом луче показан амплитудно-модулированный шумовой сигнал с горизонтальных пластин электростатического дефлектора. На втором луче показан сигнал радиационного монитора потерь пучка, размещенного вблизи мишени $ВМ$. Этот

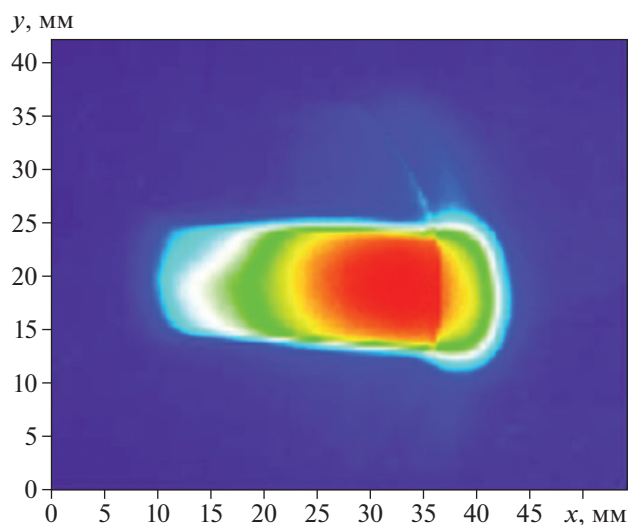


Рис. 8. Поперечный профиль плотности выведенного углеродного пучка.

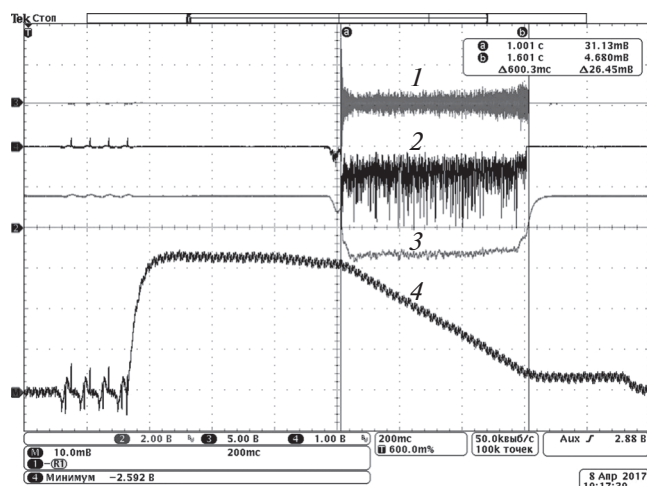


Рис. 9. Осциллограммы медленного вывода: 1 – амплитудно-модулированный шумовой сигнал с горизонтальных пластин электростатического дефлектора; 2 – сигнал радиационного монитора потерь пучка, пропорциональный мгновенному току выведенного пучка; 3 – сигнал цепи обратной связи по току выведенного пучка, модулирующий амплитуду шума раскачки (1); 4 – сигнал интенсивности пучка, циркулирующего в У-70.

сигнал прямо пропорционален мгновенному току выведенного пучка. Третий луч показывает сигнал цепи обратной связи по току выведенного пучка, модулирующий амплитуду шума раскачки (первый луч). Четвертый луч является сигналом интенсивности пучка, циркулирующего в У-70. Его линейно спадающая часть соответствует медленному выводу (деятельность 0.6 с). Интенсивность пучка $8.5 \cdot 10^9$ ядер. Способ получения импульсов тока выведенного пучка с плоской вершиной изложен в [6].

Измеренная эффективность вывода достаточно высока и составляет 50–60% при максимальной расчетной величине вблизи 85%. Основным фактором, снижающим эффективность вывода, является не вполне удовлетворительная коррекция замкнутой орбиты У-70.

Проведены измерения состава выведенного пучка по ядрам углерода и их фрагментам. Доля ядер углерода составила 95.6% [9], что свидетельствует о хорошем качестве пучка, приемлемом для прикладных исследований.

В 2013 году завершено сооружение головной части специализированного канала транспортировки пучка № 25 (длина 26.4 м), смонтирована биологическая защита и подготовлена диагностическая аппаратура, позволяющая приступить к прикладным исследованиям с применением углеродного пучка У-70 на радиобиологическом стенде [8]. Система медленного вывода позволила эффективно использовать низкочастотную си-

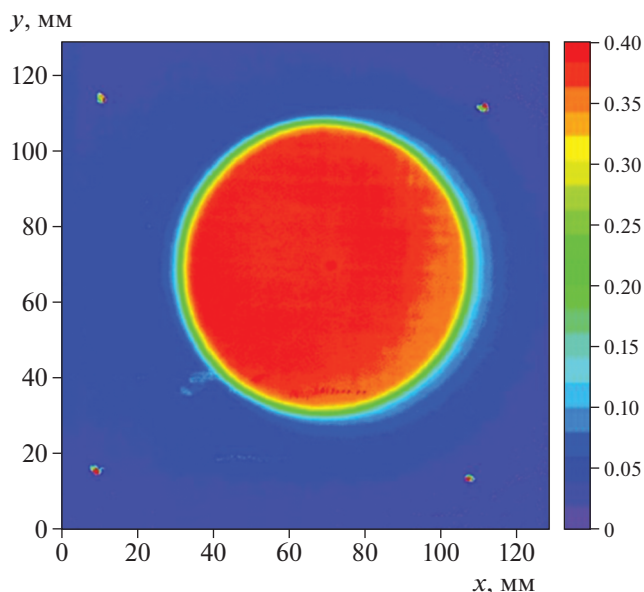


Рис. 10. Плоский поперечный профиль плотности углеродного пучка на мишени. Неравномерность поля облучения $\leq \pm 2.5\%$ в пределах радиуса развертки $R < 30$ мм, диаметр коллиматора 65 мм.

стему развертки пучка на мишени для получения плоских дозовых полей (рис. 10).

В настоящее время проводятся регулярные сеансы научно-исследовательской работы с использованием углеродного пучка, в которых принимают участие несколько организаций радиологического, медико-биологического и биофизического профиля.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснована, создана, проверена экспериментально и введена в эксплуатацию система медленного вывода углеродного пучка промежуточной энергии из синхротрона У-70. Система является комплементарной к прочим многочисленным системам вывода пучка из У-70 и создана в условиях жестких ограничений действующего ускорителя заряженных частиц. Она оказалась востребованной, простой и понятной при настройке. Система находится в эксплуатации с 2013 года и вносит заметный вклад в расширение функциональных возможностей Ускорительного комплекса У-70 по проведению актуальных прикладных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Piccioni O., Clark D., Cool R., Friedlander G., Kassner D. // Rev. Sci. Instrum. 1955. V. 26. P. 232.
2. Wright B.T. // Rev. Sci. Instrum. 1954. V. 25. P. 429.
3. Collins G.B. // Proc. of CERN Symposium on High-Energy Accelerators and Pion Physics. Report CERN 56–25. Geneva. 1956. V. 1. P. 129.

4. Handbook of Accelerator Physics and Engineering / Eds. Chao Alexander Wu, Tigner Maury. Singapore: World Scientific, 1999.
5. *Иванов С.В., Лебедев О.П.* // ПТЭ. 2013. № 3. С. 5. <https://doi.org/10.7868/S0032816213020201>
6. *Иванов С.В., Лебедев О.П.* // ПТЭ. 2015. № 4. С. 14. <https://doi.org/10.7868/S0032816215040059>
7. Review of Particle Physics (Particle Data Group) // Phys. Rev. 2018. D 98. 030001 and 2019 update. <http://pdg.lbl.gov>
8. *Антипов Ю.М., Бритвич Г.И., Иванов С.В., Костин М.Ю., Лебедев О.П., Людмирский Э.А., Максимов А.В., Пикалов В.А., Солдатов А.П., Хитев Г.В., Ульяненко С.Е., Лычагин А.А., Исаева Е.В., Бекетов Е.Е., Трошина М.В.* // ПТЭ. 2015. № 4. С. 107. <https://doi.org/10.7868/S0032816215040011>
9. *Иванов С., Афонин А., Антипов Ю., Хмарук Д., Игнашин Н., Калинин В., Кузьмин И., Лапыгин В., Лебедев О., Максимов А., Миличенко Ю., Минченко А., Солдатов А., Сытов С., Тюрин Н., Васильев Д., Зайцев А.* // Труды 26-й Российской конференции по ускорителям заряженных частиц RuPAC-2018. Протвино. 2018. С. 55. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-WEXM>