

УДК 621.384.644

РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ УСКОРИТЕЛЯ ЛУЭ-200

В. С. Александров, Н. Ю. Казаринов, А. П. Сумбаев, В. Ф. Шевцов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Проведены расчеты системы фокусировки и транспортировки пучка электронов ускорителя ЛУЭ-200 — драйвера импульсного источника резонансных нейтронов (ИРЕН) [1]. Расчеты динамики пучка электронов в тракте ускорителя с бегущей волной выполнялись с помощью программы PARMELA [2] для проектируемой конфигурации: элементов ускоряющей системы, системы магнитной фокусировки ускорителя от источника электронов до конца ускоряющей структуры, канала транспортировки пучка от выхода ускоряющей структуры до мишени. Осуществлено моделирование режимов ускорения и транспортировки при различных параметрах фокусирующего магнитного поля в ускорителе и канале, различных токах пучка и различных начальных распределениях электронов.

Calculations are performed for the focusing and transport system of an electron beam of the LUE-200 accelerator — the driver of a pulse source of resonant neutrons (IREN) [1]. The calculations of the beam dynamics in the travelling wave accelerator were carried out with the help of PARMELA code [2] for a designed configuration: elements of accelerating system, system of magnetic focusing of the accelerator from an electron source up to the end of accelerating structure, the channel of beam transport from an output of accelerating structure up to a target. Modelling of modes of acceleration and transportation is performed for various parameters of the focusing magnetic field in the accelerator and the channel, for various currents of the beam and various initial distributions of electrons.

ВВЕДЕНИЕ

Установка ИРЕН как интенсивный импульсный источник резонансных нейтронов представляет собой традиционную для ОИЯИ комбинацию из драйвера — линейного ускорителя электронов — и мишени-конвертера с бустером-размножителем.

Концепция линейного ускорителя разработана в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН на базе прототипа — форинжктора ускорительного комплекса ВЭПП-5 [3]. Проектные параметры ИРЕН по выходу нейтронов задают среднюю мощность пучка электронов ~ 10 кВт, что при длительности импульса 250 нс, значении тока электронов в импульсе 1,5 А и частоте следования импульсов 150 Гц определяет энергию электронов 200 МэВ. Из-за ограничений по размещению ускорителя в существующем здании средний темп набора энергии в ускоряющих структурах должен составлять не менее 35 МэВ/м.

1. УСКОРИТЕЛЬ ЛУЭ-200

Ускоритель состоит из электронной пушки, группирователя, двух ускоряющих секций и канала транспортировки пучка к мишени. На общей схеме (рис. 1) условно выделены

электронная пушка (К-А), группирователь (Гр), ускоряющие секции, промежуточные участки между секциями (Пр1, Пр2) и канал транспортировки пучка к мишени (М). Установка размещается вертикально в двух верхних этажах трехэтажного здания башенного типа. Пушка, группирователь и первая секция ускорителя размещаются в верхнем этаже, вторая секция — этажом ниже. Ускоренный пучок транспортируется в нижний этаж (мишенный зал) к мишени, откуда пучки нейтронов по специальным каналам направляются к экспериментальным установкам.

Электронная пушка представляет собой диодную систему (катод–анод) с накальным экранированным катодом под высоким потенциалом и полым заземленным анодом. Пучок электронов формируется электрическим полем электронно-оптической системы пушки и через полый анод выпускается в канал ускорительного тракта.

Ускоряющая система ЛУЭ-200 состоит из группирователя и двух ускоряющих секций, в каждую из которых подается СВЧ-мощность от независимых клистронных усилителей на базе клистрона 5045 SLAC, работающих на частоте 2856 МГц.

Группирователь [4], схематически показанный на рис. 2, состоит из четырех связанных цилиндрических резонаторов (три чашки-ячейки + трансформатор типа волны-устройства ввода СВЧ-мощности) с рабочей частотой 2855,6 МГц. В группирователе используется рабочий тип колебаний $4\pi/3$. Собственная добротность 3303. Распределение напряженности продольного электрического поля вдоль оси группирователя показано на рис. 3.

Ускоряющие секции представляют собой круглый диафрагмированный волновод с постоянным импедансом — постоянной геометрией ячеек по всей длине (рис. 4). Основные параметры секции приведены в [5].

Фокусирующая система состоит из канала соленоидальной фокусировки и канала квадрупольной фокусировки.

Канал соленоидальной фокусировки (рис. 1) используется в области формирования пучка и ускорения от энергии 200 кэВ до 100 МэВ. Он состоит из магнитных линз АС, МЛ1 и МЛ2 источника электронов и системы соленоидов, охватывающих группирователь (катушка группирователя КГ) и первую ускоряющую секцию. В процессе проектирования конфигурация канала соленоидальной фокусировки варьировалась. В первоначальном варианте канала [3] фокусировка пучка в первой секции осуществлялась системой двух соленоидов: С1 (длина $\sim 0,75$ м, поле $\sim 1,5$ кГс) и С2 (длина $\sim 2,1$ м, поле $\sim 4,0$ кГс) со встречным направлением полей. При осуществлении расчетов и численной оптимизации полей система двух соленоидов заменялась одним секционированным соленоидом С1 (16 секций), охватывающим первую ускоряющую секцию по всей длине ускорения.

Канал квадрупольной фокусировки используется после выхода пучка из первой ускоряющей секции, ускорении во второй секции от энергии 100 до 200 МэВ и при дальнейшей транспортировке пучка к мишени. Канал состоит из девяти квадрупольных линз Q1–Q9. Согласующая линза Q1 совмещена с корректором положения пучка К3. Квадрупольные линзы Q2–Q5 с апертурой диаметром 160 мм установлены на вторую ускоряющую секцию и образуют два дублета для проводки пучка через канал малой апертуры (внутри секции). Квадрупольные линзы Q6–Q9 с апертурой 60 мм образуют еще два дублета для проводки и фокусировки пучка на мишень. Квадрупольные линзы Q8 и Q9 располагаются в зале мишени.

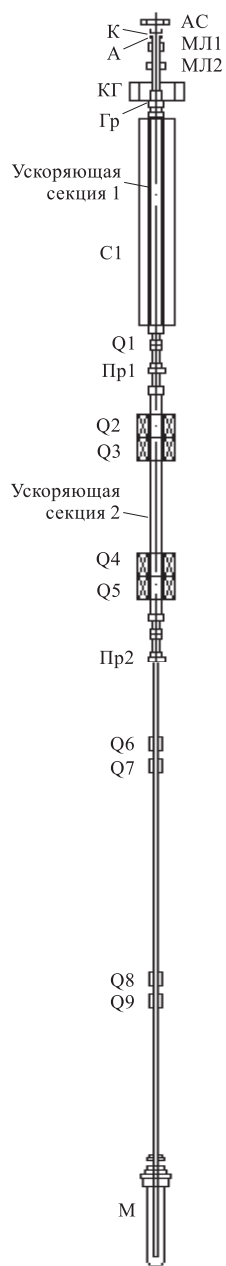


Рис. 1. Общая схема ускорителя ЛУЭ-200 и канала транспортировки

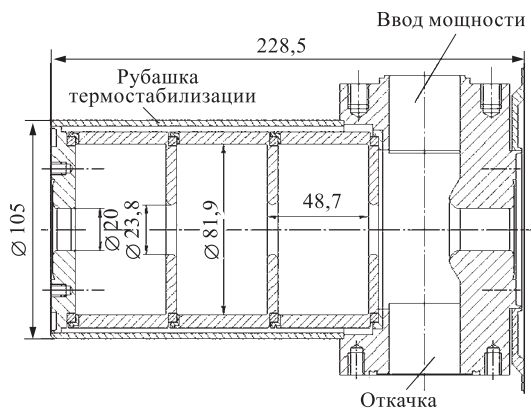


Рис. 2. Общая схема группирователя

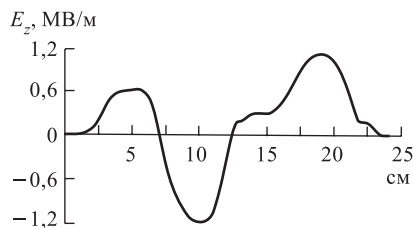


Рис. 3. Распределение напряженности продольного электрического поля вдоль оси группирователя

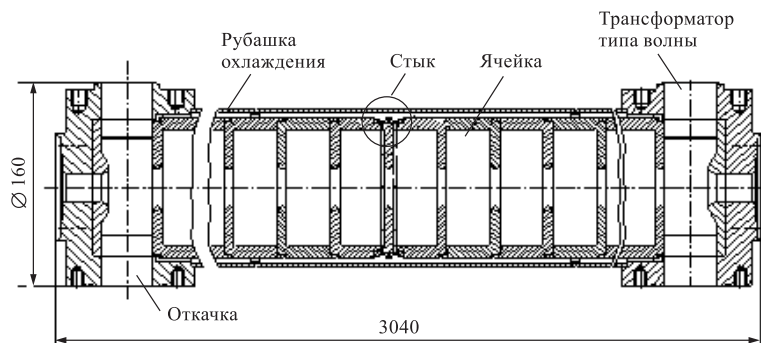


Рис. 4. Геометрия ускоряющей секции

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЕ И КАНАЛЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ

Моделирование динамики пучка проводилось с целью оптимизации параметров канала соленоидальной фокусировки и канала квадрупольной фокусировки при штатной расстановке фокусирующих элементов, обусловленной спецификой «привязки» ускорителя и канала транспортировки к существующему зданию.

К задачам моделирования относились:

— оптимизация величины и распределения продольного магнитного поля в области катодного узла и группирователя;

— проверка возможности снижения уровня магнитного поля в соленоидах и исключения реверса поля в области первой ускоряющей секции.

— оптимизация параметров канала квадрупольной фокусировки, обеспечивающих требуемые ток (1,5 А) и размеры (\varnothing 20 мм) пучка на размножающей мишени при штатной расстановке квадрупольных линз, обусловленной спецификой размещения ускорителя и канала транспортировки в существующем здании.

Расчеты динамики пучка проводились с помощью программы PARMELA. Начальные параметры пучка электронов на выходе электронной пушки задавались согласно [1]:

Энергия электронов	200 кэВ
Максимальный ток пучка в импульсе до	3 А
Длительность импульса тока пучка	250 нс
Поперечный размер пучка	$r = 4$ мм
Эмиттанс пучка (не более)	$\leq 0,01 \pi \cdot \text{см} \cdot \text{рад}$
Энергетический разброс	≤ 2 кэВ.

Ускоряющая и фокусирующая система должны обеспечивать формирование на мишени пучка электронов с параметрами:

Энергия электронов	200 МэВ
Максимальный ток пучка в импульсе	1,5 А
Длительность импульса тока пучка	250 нс
Радиус пучка на мишени	10 мм.

В качестве начальных распределений плотности электронов по сечению пучка использовались:

— распределение Владимирского–Капчинского (микрочаноническое) в поперечном фазовом пространстве и равномерное распределение по начальным фазам (от нуля до 360°) и энергетическому разбросу;

— гауссовское распределение по поперечному сечению пучка и равномерное распределение по начальным фазам при нулевых эмиттансе и энергетическом разбросе.

При моделировании движения частиц в группирователе с помощью программы PARMELA использовались амплитуды гармоник фурье-распределения электрического поля, представленного на рис. 3. Для учета квадрупольной фокусировки вторая секция разбивалась на пять частей с ускоряющими электрическими полями, подобранными так, чтобы сохранить необходимый набор энергии на длине секции.

Как следует из результатов работы [5], энергия ускоренных банчей пучка уменьшается приблизительно линейно с длиной (длительностью) пучка и пропорционально его току. При моделировании ускорения и транспортировки различных сгустков пучка электронов электрическое поле уменьшалось так, чтобы получить среднюю энергию сгустка с учетом beamloading-эффекта.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приведенная на рис. 1 геометрия элементов формирования магнитного поля в области от катода до конца первой ускоряющей секции была использована в расчетах с помощью программы POISSON.

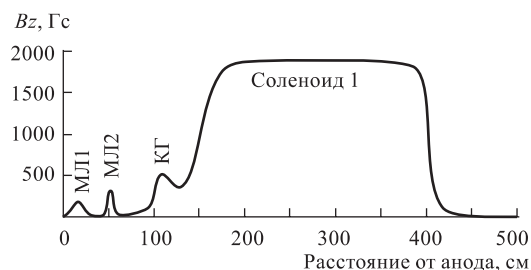


Рис. 5. Распределение магнитного поля в канале соленоидальной фокусировки

Моделирование показало, что требуемые параметры пучка на мишени могут быть достигнуты при уровне продольного магнитного поля в ускоряющей секции ≤ 2 кГс и без изменения его направления. Распределение магнитного поля на оси канала для оптимальных параметров элементов показано на рис. 5.

Для сформированного магнитного поля в области катодного узла и группирователя эффективность захвата в режим ускорения составляла $\sim 80\%$. Изменение взаимного расположения квадруполь Q6–Q9, связанное с размещением канала в существующем здании, потребовало оптимизации градиентов квадруполь по параметрам пучка на мишени. Оптимизация проводилась по методике и программе, описанным в [6], параметры приведены в таблице.

Параметры канала квадрупольной фокусировки

Наименование	Осевой размер по железу, мм	Физическая апертура, мм	Рабочая апертура, мм	Расчетный градиент, Гс/см	Макс. градиент, Гс/см
Q1	100	20	10	161	200
Q2	200	160	30	-267	300
Q3	200	160	30	277	300
Q4	200	160	30	-306	300
Q5	200	160	30	306	300
Q6	200	60	30	-146	350
Q7	200	60	30	108	350
Q8	200	60	30	-181	350
Q9	200	60	30	198	350

Токопрохождение по тракту ускорителя и в канале транспортировки, а также набор энергии в процессе ускорения в данном варианте расчета показаны на рис. 6, 7. Общие потери пучка составляют около 25% при начальном токе пучка 2 А. Основные потери пучка происходят в области группирователя. Максимальная энергия электронов на мишени составляет 204 МэВ, средняя энергия 192 МэВ для первого банча импульса тока.

Те же параметры для последнего (715-го) банча составляют 145 и 137 МэВ соответственно. Стандартное отклонение энергии от средней (полуширина распределения на

полувысоте) равно 23 МэВ. При этом минимальная энергия электронов (> 65 МэВ) находится в требуемой области эффективного производства нейтронов в фотомишени (> 60 МэВ [3]).

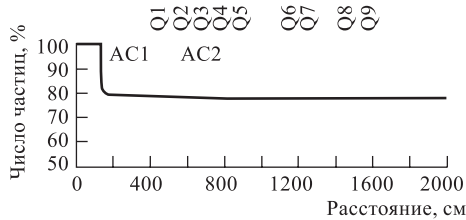


Рис. 6. Токпрохождение по тракту

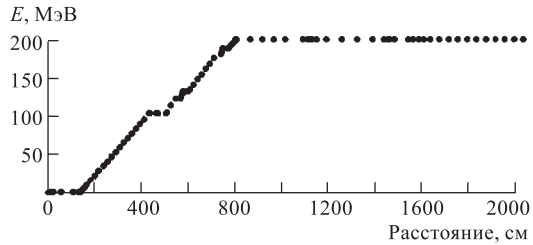


Рис. 7. Набор энергии по длине тракта

На рис. 8 показано поведение поперечных размеров пучка при ускорении и транспортировке, рассчитанное с помощью программы PARMELA.

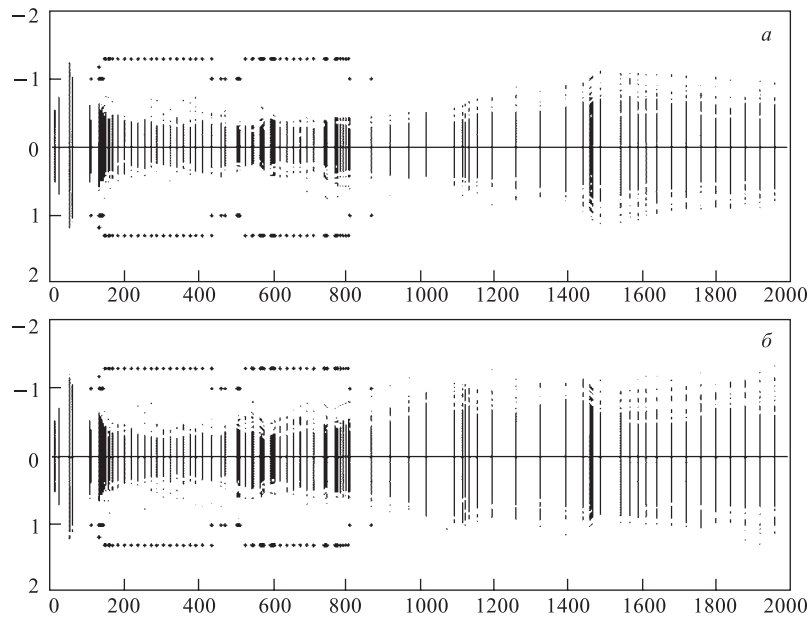


Рис. 8. Огибающие пучка: а) x -размер; б) y -размер

На рис. 9 приведены распределения частиц в поперечном сечении пучка на мишени для начальных микроканонической и гауссовской расстановок электронов. Как видно из рисунка, полуразмер пучка на мишени (3 стандартных отклонения) не превышает 5 мм в случае микроканонического начального распределения и 4 мм для гауссовского. Токпрохождение уменьшилось на 5% по сравнению с микроканоническим начальным распределением. Импульс тока на мишени и энергетический спектр первого банча показаны на рис. 10.

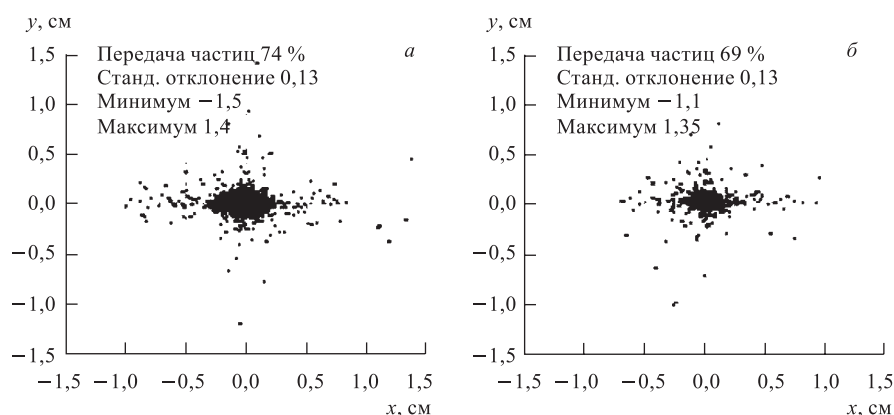


Рис. 9. Распределение частиц в поперечном сечении пучка на мишени для начальных микроканонического (а) и гауссовского распределений (б)

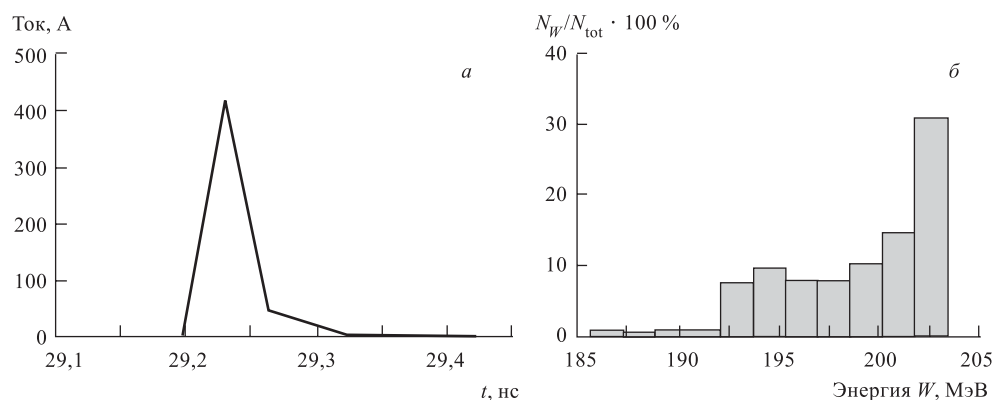


Рис. 10. Импульс тока (а) и энергетический спектр банча № 1 на мишени (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенных расчетов установлено, что предложенная схема ускорителя и канала транспортировки работоспособна как при номинальных параметрах, так и при различных конфигурациях фокусирующего магнитного поля в ускорительном тракте, различных токах и начальных распределениях электронов в пучке. Параметры ускоренного пучка: полуразмеры на мишени меньше 10 мм, средняя конечная энергия 165 МэВ, минимальная энергия > 65 МэВ, максимальная 204 МэВ, токопрохождение 70–75 % при начальном токе пучка 2 А — удовлетворяют проектным требованиям [1–2].

2. Изменение знака магнитного поля в соленоиде не оказывает заметного влияния на динамику и конечные параметры пучка. Использование внешнего магнитного экрана соленоида приводит к 3 %-му увеличению максимума индукции магнитного поля на оси, что тоже не сказывается на конечных параметрах пучка.

3. Снижение уровня магнитного поля в ускоряющей секции до 2–2,5 кГс при оптимизированных значениях градиентов квадрупольных линз не усложняет получение требуемого размера пятна пучка на мишени при удовлетворительном токопрохождении пучка по тракту.

4. Для проведения возможной коррекции размеров ускоренного пучка необходимо иметь запас в 25–30 % величин градиентов квадрупольных линз по сравнению с номинальными.

5. Собственное поле пучка (без учета эффектов wake field) в рассмотренном диапазоне начальных токов (2–5 А), конфигураций магнитных полей ускорителя (максимальное поле соленоида С1 от ± 2 до ± 5 кГс), заданной начальной энергии электронов и заданной расстановке и параметрах линз канала транспортировки при различных начальных распределениях (микроканоническое и гауссовское) не оказывает существенного влияния на динамику пучка.

Таким образом, при фиксированных градиентах линз удастся провести пучок при планируемых ($\sim 25\%$) потерях электронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кобец В. В. и др.* Проект ИРЕН: Статус и первые результаты // Тр. IV науч. семинара памяти В. П. Саранцева. Дубна, 2002. С. 150.
2. *Mouton B.* The PARMELA Program. LAL/SERA 93-455. Orsay, 1993.
3. *Novokhatsky A. V. et al.* Linear Accelerator for Intense Resonance Neutron Source (IREN) // Proc. of the 2nd Workshop on JINR Tau-Charm Factory. Dubna, 1994. P. 197–211.
4. *Павлов В. М.* СВЧ-группирователь форинжектора ВЭПП-5. Новосибирск: ИЯФ им. Г. И. Будкера, СО РАН, 2002.
5. *Александров В. С. и др.* Моделирование нагрузки током пучка ускорителя ЛУЭ-200 // Докл. на V Науч. семинаре памяти В. П. Саранцева, Дубна, 23–24 сент. 2003 г.
6. *Alexandrov V. S. et al.* Optimization of transportation channel parameters for beams with large space charge // Proc. of ISPP2002, Mianyang, China, 2002. P. 75;
Казаринов Н. Ю., Шевцов В. Ф. Оптимизация параметров каналов транспортировки пучков с большим пространственным зарядом. Дубна, 2002.