

## РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ НАГРУЗКИ ТОКОМ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ В УСКОРИТЕЛЕ ЛУЭ-200

*Т. В. Бондаренко<sup>а</sup>, С. М. Полозов<sup>а,1</sup>, А. П. Сумбаев<sup>б</sup>*

<sup>а</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

<sup>б</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Численно исследована динамика пучка электронов в группирователе и ускоряющей секции линейного ускорителя электронов ЛУЭ-200 с бегущей волной 10-см диапазона для оценки влияния нагрузки ускоряющего поля током ускоряемого пучка на его параметры, такие как коэффициент захвата в режим ускорения, средняя энергия, спектр пучка на выходе и т. д. По результатам моделирования динамики выработаны рекомендации для улучшения параметров пучка и снижения влияния нагрузки ускоряющей структуры пучком.

Dynamics of the electron beam for traveling wave S-band linac LUE-200 is studied by numerical simulation. Influence of beam loading to beam characteristics as capturing coefficient, output energy and output spectrum was simulated. Ways to enrich the beam quality and to decrease beam loading influence are discussed.

PACS: 29.17.w; 29.27.Bd

### ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то что ускоритель ЛУЭ-200 [1–3] является действующим и проработал на эксперимент уже более пяти лет, некоторые из его базовых систем сложно назвать оптимальными, так как качество пучка, в частности средняя энергия частиц, энергетический спектр пучка и его размеры на мишени, оставляют желать лучшего, а потери пучка при транспортировке по тракту ускорения требуют дальнейшей минимизации. В физическом обосновании проекта ускорителя ЛУЭ-200 [1] авторы допускали определенную «подгрузку» ускоряющего СВЧ-поля ускоряющей структуры постространственным зарядом ускоряемого пучка. На рис. 1 представлена проектная зависимость от тока пучка  $I$ : средней энергии электронов  $U$  и энергетического разброса  $\delta U/U$  на выходе ускорителя, а также эффективности передачи средней мощности клистрона в пучок  $\eta$ . Подстановка в расчетные величины проектных для ЛУЭ-200 значений  $U_{rf} = \sqrt{P_0 R_{sh} L}$  и  $I_{rf} = \sqrt{P_0 / R_{sh} L}$ , где  $P_0$  — СВЧ-мощность, переданная от клистрона в структуру,  $R_{sh} = 53$  МОм/м — шунтовое сопротивление ускоряющей структуры, а  $L = 3$  м — длина секции, определяет для ускорителя величину оптимального значения тока пучка 1,5 А.

---

<sup>1</sup>E-mail: smpolozov@mephi.ru

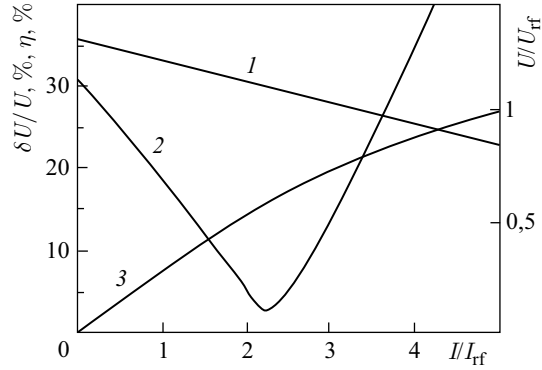


Рис. 1. Зависимость средней энергии электронов (1), энергетического разброса (2) на выходе ускорителя и эффективности передачи средней мощности клистрона в пучок (3) от тока пучка

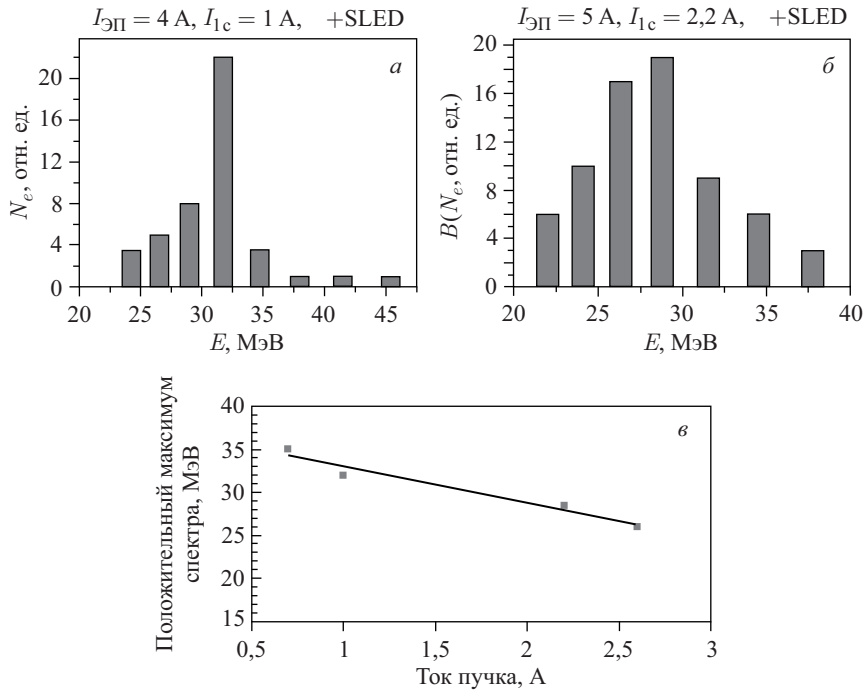


Рис. 2. Типичные спектры энергии пучка электронов при возбуждении ускоряющей структуры пучками электронов (а, б) и «нагрузочная характеристика» ускоряющей структуры (в) при ускорении электронных пучков с разными токами

При реализации проекта в процессе наладки и эксплуатации были произведены измерения энергии, энергетических спектров пучка электронов (рис. 2, а, б) и «нагрузочной характеристики» ускоряющей секции (рис. 2, в) при ускорении пучков электронов с разными токами [2, 3]. Заметно, что при увеличении тока пучка средняя энергия электронов снижается, а энергетический спектр пучка становится шире. Кроме того, реальная

«пропускная способность» ускоряющей системы, состоящей из группирователя и первой секции, увеличивается с ростом СВЧ-мощности, закачиваемой в структуру, но ни при каких условиях не превышает 50 %.

## 1. ОБЩАЯ СХЕМА УСКОРИТЕЛЯ, ОСОБЕННОСТИ ПИТАНИЯ И ГРУППИРОВКИ ПУЧКА

Ускоритель состоит из источника электронов, системы формирования и диагностики пучка при малых значениях энергии, четырехячеечного группирователя, работающего на стоячей волне, и одной основной ускоряющей секции на бегущей волне длиной около 3 м (85 ячеек) [1–3]. Питание осуществляется от мощного импульсного клистрона с использованием компрессии мощности в системе типа SLED с коэффициентом усиления по мощности около 4,5. Изначально предполагалось, что для питания ускорителя будет использован клистрон SLAC 5045 мощностью до 65 МВт, однако в настоящее время используется менее мощный клистрон Thales TH 2129, который обеспечивает мощность после SLED около 80 МВт. Это позволяет рассчитывать на выходную энергию пучка около 60 МэВ (без учета влияния нагрузки током) вместо расчетной  $\sim 110$  МэВ. Рабочий импульсный ток в ЛУЭ-200 составляет 1–2 А.

Для питания группирователя используется 17-дБ ответвитель, через который подводится около 1 МВт мощности. Группирователь является оригинальной разработкой ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН [4], состоит из четырех ячеек, изготовленных из нержавеющей стали, и работает на стоячей волне в виде колебаний  $4\pi/3$  [4].

С целью определения возможностей дальнейшего развития ускорителя, снижения потерь пучка и повышения его мощности было проведено моделирование динамики пучка электронов для оценки параметров (максимальной энергии, спектра и т. д.) пучка и определения оптимальных условий группировки и перезахвата пучка после группирователя в основную секцию. Моделирование проводилось с использованием разработанной на кафедре электрофизических установок МИФИ программы BEAMDULAC-BL [5]. Группирователь оказывает огромное влияние на динамику пучка в ускорителе в целом и не обеспечивает ни эффективного сжатия пучка по фазам, ни увеличения средней энергии ступка до значения около 2,0–2,5 МэВ, оптимального для перезахвата основной секцией. Особенности использованного группирователя приводят к тому, что спектр пучка на выходе не лучше  $\pm 20\%$  (по основанию). При ненулевом токе пучка фазовый размер пучка на выходе близок к  $\pi$ , что не позволяет обеспечить эффективного перезахвата пучка основной секцией. Фактически, из-за отсутствия в группирователе синхронизма с пучком, он работает в режиме гармонического банчера с достаточно коротким пространством дрейфа. Положительным моментом в работе группирователя может считаться то, что в нем средняя энергия ступка увеличивается до 0,9 МэВ, что несколько улучшает захват в основную секцию. Коэффициент токопрохождения в группирователе слабо зависит от тока и составляет около 70 %. После численной оптимизации канала транспортировки и выбора мощности питания его расчетное значение удалось довести до 90 %. Существенное влияние на динамику также оказывает разность фаз СВЧ-поля, при которых центр ступка вылетает из группирователя и влетает в основную секцию. Оптимальная разность фаз должна быть различна для каждого тока и существенно влияет как на перезахват, так и на конечную энергию.

## 2. ДИНАМИКА ПУЧКА В ОСНОВНОЙ СЕКЦИИ

Основная секция ЛУЭ-200 состоит из 85 ячеек, работает на бегущей волне, вид колебаний  $2\pi/3$ . Ее особенностью является низкий коэффициент связи по магнитному полю между ячейками, обусловленный тем, что связь осуществляется только по пролетному каналу. Это приводит к тому, что групповая скорость волны составляет 2,1 % от скорости света. Проведенное численное моделирование показало, что при мощности питания после SLED около 80 МВт для пучка с нулевым током максимально вероятная энергия составляет около 60 МэВ. Нагрузка током оказывает огромное влияние на динамику пучка. Моделирование в режиме «ускорения на запасенной энергии» показало, что инжекция в основную секцию пучка с током выше 1 А снижает энергию на выходе в установившемся режиме до 20 МэВ (что ниже экспериментально измеренной). Этот результат, с одной стороны, говорит о некорректности использования данной модели, а с другой — о недостаточности мощности питания при таких токах. Кроме того, малое значение групповой скорости приводит к большому времени заполнения структуры СВЧ-мощностью и длительному выходу на стационарный режим по нагрузке током.

Для определения параметров пучка в стационарном режиме динамика моделировалась с учетом просадки поля в ячейках при пролете каждого из 46 ступков, с которыми взаимодействует каждый период СВЧ-поля при движении от входного до выходного порта, и подкачки мощности через трансформатор типа волны в первые ячейки. Ток инжекции был выбран равным 1,5 А, при влете в основную секцию — 1,4 А. Необходимо отметить, что расчетный коэффициент токопрохождения в группирователе составляет около 90 %

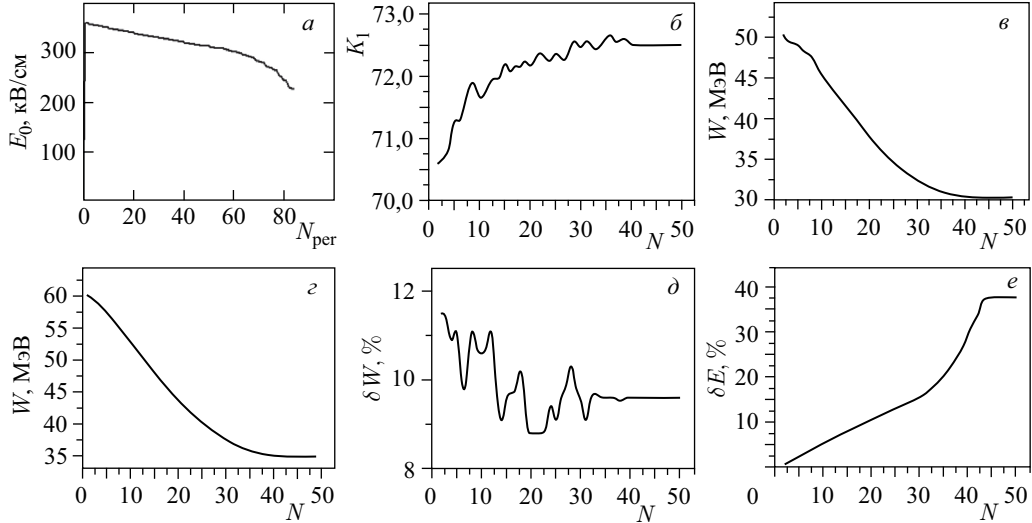


Рис. 3. Результаты моделирования динамики пучка в многоступковом режиме с учетом подкачки мощности (ток инжекции 1,5 А, 1,4 А на входе в основную секцию): распределение амплитуды СВЧ-поля в ячейках после выхода на стационарный режим (а), коэффициент токопрохождения (б), средняя (в) и максимально вероятная (г) энергия для всех частиц на выходе секции, полуширина спектра (по основанию) (д), доля поглощенной мощности для ячейки, из которой отобрана максимальная мощность, в зависимости от номера ступка (е)

после проведенной оптимизации по амплитуде поля и позволяет получить коэффициент токопрохождения «front-to-end» около 70 %. Однако такие параметры группировки и, соответственно, ее результат могут существенно отличаться от реального. Показано, что примерно к сороковому сгустку ускоряющая секция выходит на стационарный режим, в котором максимально вероятная энергия пучка составляет 34,9 МэВ, а средняя энергия для всех частиц, дошедших до конца ускорителя, равна 30,3 МэВ. Для следующих сгустков параметры на выходе перестают меняться. Этот результат в целом соответствует измеренному экспериментально (см. рис. 2). Необходимо отметить, что в установившемся режиме подводимой энергии не хватает для равномерного заполнения ускоряющей структуры — для последних 15–20 ячеек наблюдается (рис. 3) резкий спад амплитуды поля. В последних нескольких ячейках пучок практически не ускоряется. Это говорит о том, что при расчете структура не была оптимизирована «на максимальную энергию». Также она не была оптимизирована и «на максимальный КПД», который будет достигнут при длине структуры, равной 90–92 периодам. На рис. 3 показаны некоторые результаты численного моделирования, иллюстрирующие изложенные выше выводы.

### **3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УЛУЧШЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКА**

Динамика пучка в основной секции также была промоделирована при питании от клистрона мощностью 45 и 65 МВт. При больших мощностях питания влияние нагрузки током намного меньше. В первом случае коэффициент токопрохождения на 20 % выше, чем при мощности клистрона 20 МВт, а конечная энергия после выхода на стационарный режим составляет около 55 МэВ, при мощности клистрона 65 МВт — около 105 МэВ. Необходимо отметить, что оптимальной мощностью питания группирователя по-прежнему является  $\sim 1$  МВт, что потребует регулировки направленного ответвителя при замене клистрона.

Для повышения эффективности группировки пучка и увеличения коэффициента захвата до 70–75 % может быть рекомендована замена существующего группирователя на адиабатический. Возможный вариант такого группирователя, состоящий из 6 ячеек, в которых амплитуда СВЧ-поля и фазовая скорость волны монотонно растут с номером ячейки, был разработан в МИФИ в 2014 г. для промышленного ускорителя. Его применение позволило довести коэффициент токопрохождения до 70 % и уменьшить спектр пучка на выходе основной секции до 7–8 % (полная ширина по основанию пика распределения). Энергия пучка после группирователя составляет 1,8 МэВ и легко может быть доведена до оптимальных для инъекции в основную секцию ЛУЭ-200 2,5 МэВ добавлением к группирователю двух регулярных ячеек, одна из которых будет выполнять функции ввода мощности и трансформатора типа волны.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

По результатам проведенного численного моделирования динамики пучка электронов в ускорителе ЛУЭ-200 с учетом влияния нагрузки током можно сделать вывод, что:

1. Существующий группирователь не обеспечивает ни эффективного сжатия пучка по фазам, ни увеличения средней энергии сгустка до значения около 2,0–2,5 МэВ, оптимального для перезахвата основной секцией.

2. Нагрузка током в основной секции оказывает определяющее влияние на динамику пучка и его параметры на выходе. Это связано как с большим ускоряемым током, так и с малой групповой скоростью волны СВЧ-поля в секции. Вынужденная замена клистрона SLAC 5045 на клистрон ТН2129, в три раза менее мощный, усугубила эту проблему.

Для улучшения параметров пучка и снижения влияния нагрузки током могут быть даны следующие рекомендации:

1. Принять во внимание, что использование клистронов мощностью 45–50 МВт не только увеличивает среднюю энергию частиц пучка, но и значительно улучшает его энергетический спектр.

2. Выбрать оптимальное значение разности фаз между секциями для рабочего значения тока пучка.

3. Рассмотреть вопрос о реконструкции группирователя, например, замены его на адиабатический.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Novohatsky 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.
2. *Белозеров А. В. и др.* Физический пуск первой очереди установки ИРЕН // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 7(163). С. 923–932.
3. *Бечер Ю. и др.* Ускоритель ЛУЭ-200 установки ИРЕН: состояние и развитие // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 5(189). С. 1029–1039.
4. *Павлов В. М.* СВЧ-группирователь форинжектора ВЭПП-5. Препринт ИЯФ СО РАН 2002-10.
5. *Bondarenko T. V., Masunov E. S., Polozov S. M.* BEAMDULAC-BL Code for 3D Simulation of Electron Beam Dynamics Taking into Account Beam Loading and Coulomb Field // Problems of At. Science and Technology. Ser.: Nucl. Phys. Investigations. 2013. V. 6, No. 88. P. 114–118.